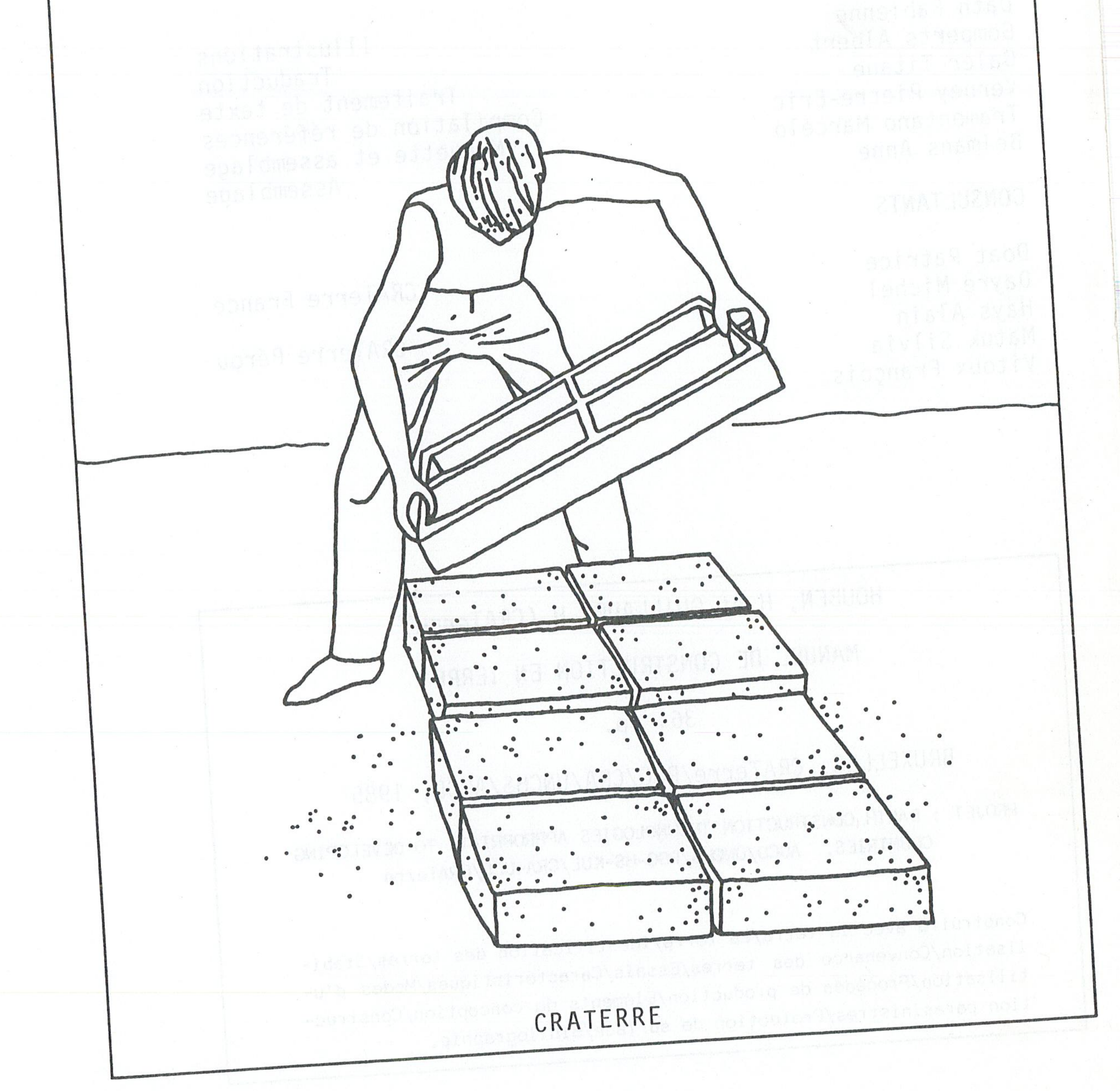
MANUEL DE CONSTRUCTION EN TERRE



FICHE TECHNIQUE

AUTEURS

Houben Hugo
Guillaud Hubert

CRATerre
186 Dreef
B - 1900 Overijse
Belgique

EQUIPE

Dath Fabienne	Illustrations
Gomperts Albert	Traduction
Galer Titane	Traitement de texte
Verney Pierre-Eric	Compilation de références
Tramontano Marcelo	Maquette et assemblage
Belmans Anne	Assemblage

CONSULTANTS

Doat Patrice
Dayre Michel
Hays Alain
Matuk Silvia
Vitoux François

CRATerre France

CRATerre Pérou

HOUBEN, H et GUILLAUD, H (CRATerre)

MANUEL DE CONSTRUCTION EN TERRE

361 pp.

BRUXELLES, CRATerre/PGC/CRA/UNCHS/AGCD, 1985

PROJET : EARTH CONSTRUCTION TECHNOLOGIES APPROPRIATE TO DEVELOPING COUNTRIES. AGCD/UNCHS/PGC-HS-KUL/CRA-UCL/CRATerre

Construire avec la terre/La terre/Identification des terres/Stabilisation/Convenance des terres/Essais/Caractéristiques/Modes d'utilisation/Procédés de production/Eléments de conception/Construction parasinistres/Protection de surface/Bibliographie.

Ce manuel est une traduction exacte du texte qui, à l'origine, a été présenté dans "Earth Construction Primer" préparé pour le projet "Earth Construction Technologies Appropriate to Developing Countries".

A Jacques Chaudoir (1948-1981) qui, en Algérie, m'a fait comprendre que la pratique de la construction en terre pouvait être professionnelle.

Hugo Houben

Au Prof. Dr. Jean Pieri, mon grand-père, à la recherche d'une relation harmonieuse entre humanisme, science et technologie.

Hubert Guilla

PREFACE

THE PROJECT "EARTH CONSTRUCTION TECHNOLOGIES APPROPRIATE TO DEVELOPING COUNTRIES"

During Habitat : United Nations Conference on Human Settlements (Vancouver 1976), great emphasis was placed on the need for countries to develop and promote building materials and techniques that would be suitable for local conditions. Subsequently, the Commission on Human Settlements, at its annual sessions, has called attention to various issues relating to appropriate building technologies. For example, in resolution 3/2, the Commission recommended, inter alia, that Governments "stimulate research and disseminate findings on efficient methods of construction, low-cost design and technology for infrastructure, and indigenous building materials". Several theme papers have also dealt with the subject.

Earth has been used throughout history as a construction material and is still one of the most commonly used building materials in low-income communities in developing countries. Interest in improving its usefulness has been attracting considerable attention throughout the world, and the number of earth-construction projects,both in developing and industrialized countries, is increasing.

The project entitled " Earth Construction Technologies Appropriate to Developing Countries " is among the many serious contributions made to the topic by independent groups,either by means of research or through publications, exhibitions and colloquia. The project has been funded by the Belgian Administration for Development Co-operation, and sponsored by the United Nations Centre for Human Settlements (Habitat). It was jointly executed by the Post Graduate Centre/Human Settlements of the Katholieke Universiteit, Leuven, Belgium; the Centre de Recherches en Architecture of the Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Belgium; and by Hugo Houben, member of CRATerre (Centre de Recherche et d'Application Terre) Belgium, France, Peru, Germany.

The research in question has two major objectives. It sought, first, to define clearly the potential for and constraints to earth as a building material in a continuously evolving world and, secondly, to promote the use of earth in construction, wherever desirable. After a methodology had been worked out, a set of selective case studies, comprising data on different factors (socio-economic, socio-cultural, physical, political, architectural, etc.) was drawn up, along with an analysis of the data. Finally, a synthesis of all the case studies was compiled.

In the present series, selected case studies are published as follows :

Vol. I	Kenya, Zambia
Vol. II	China, Thailand
Vol. III	New Mexico, (U.S.A.), Mexico
Vol. IV	Tunisie, Côte d'Ivoire(in French only)
Vol. V	Ecuador (issued in Spanish only)

The synthesis appears as volume VI. Volume VII contains guidelines for policy makers and professionals in developing countries, and covers the scope, advantages and requirements of earth construction. It deals with the need for builders to understand why and where earth can efficiently be used as a material and with the difficulty of choice that is presented. It also illustrates the logical sequence in deciding whether or not to use earth.

Volume VIII, designed for middle-level technicians, is a primer on earth construction, and deals with such matters as building material characteristics; production and construction methods; design in general and for natural disaster regions in particular; economic aspects; etc.

Finally, various audio-visual materials were produced in order to make the scope of the project (first stage) more immediate and to provide more detailed information on the characteristics of earth as a building material and on appropriate building methods (second stage).

LIMINAIRE

... It was emphasized that the existing polarization of opinions with regard to what should be regarded as appropriate building technology for any developing country must cease. With widely divergent conditions existing in developing countries, no single pattern of technology could be considered as universally appropriate. In the selection and use of building technologies, it would be necessary to rely upon the whole range of technologies available. ...
... There seemed to be a general consensus in many countries that it was important to provide tools for a more informed choice of technology. That would make it possible to pinpoint those conditions for which a technology should be appropriate and consequently to select a technology which would prove appropriate to a certain area and type of project. ...

Ref. ; in "Report of the ad hoc expert group meeting on the development of the indigenous construction sector - Nairobi, 23-30 November 1981" - United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), Nairobi 1982.

La conception et la mise en forme de notre "Earth Construction Primer" ont été dictées par le souci d'exposer la plus large panoplie de possibilités de solutions portées par le matériau terre, afin de favoriser un choix raisonné de la part des décideurs. Connaître les potentialités réelles de ce matériau pour mieux les exploiter, et surtout pour ne pas mal les exploiter. Car l'emploi de ce matériau ne permet pas l'erreur. Car les possibilités de ce matériau ne sauraient être niées à cause de démonstrations râtées dues à l'ignorance ou même à des négligences.

La construction en terre peut être approchée à un niveau technique et même scientifique, à l'égal d'autres technologies de construction. L'effort actuel de recherche dans ce domaine le prouve. Ce matériau n'est pas limité dans ses applications, pour peu que l'on sache exploiter à bon escient la plus large gamme de ses qualités et pallier ses défauts.

Depuis les applications vernaculaires, qui cumulent des siècles d'expérience de terrain et un savoir-faire souvent très élaboré, jusqu'à la construction moderne qui a pu introduire un réel degré de sophistication et surtout une recherche technique très poussée, la construction en terre est riche de possibilités variées et d'une grande souplesse d'adaptation à des contextes pluriels. Il n'est pas possible de valoriser la démarche technologique par rapport à la démarche vernaculaire, ou vice versa. En effet, beaucoup de codes de bonne pratique traditionnels s'accordent aux standards contemporains : le savoir-faire "savant" rejoint le savoir-faire populaire et semble ne pas pouvoir le dépasser dans la justesse des solutions techniques ou architecturales proposées. Ces deux démarches portent également leurs qualités et leurs déficiences et peuvent s'accorder dans leur efficacité tout comme dans leur incohérence.

Le but que nous poursuivons avec ce livre n'est pas fondamentalement d'apporter du nouveau dans le domaine de la construction en terre mais surtout d'initier une nouvelle réflexion qui prenne en compte la globalité du procès de production. Il s'agit bien de donner les outils permettant de prendre des décisions et des choix raison-

nés, sensés en favorisant un aller-retour permanent entre une approche globalisante des problèmes posés (où n'est pas seulement prise en compte la variable technique mais aussi les variables culturelles, sociales et économiques) et une approche soucieuse du détail.

Lorsqu'on l'aborde, la construction en terre peut sembler être un vaste puzzle très confus. Mais, un long et lent travail montre que le puzzle peut être achevé en collectant et en ordonnant, en positionnant patiemment chaque pièce.

Notre volonté première a été de rassembler les pièces de cette information éparpillée dans une littérature abondante et universelle, puis de la classer, de l'ordonner, de la simplifier afin de la rendre accessible à un large public d'intérêts et de compétences. Aller à l'essentiel, en contenu de textes et d'illustrations volontairement cerné. Aborder tous les problèmes qui peuvent se poser, à différents niveaux : en amont, aux stades décisionnels et au fil des étapes logiques et ordonnées de l'élaboration, de la conception et de la réalisation des projets. Cette volonté de mise en ordre des connaissances accumulées devrait, si les objectifs ambitieux sont couverts, être porteuse d'une accessibilité à ces connaissances et surtout, d'un projet didactique. Car cet ouvrage devrait non seulement servir aux praticiens de terrain mais aussi ceux promoteurs et acteurs d'une formation indispensable, en amont des applications.

Ce "primer" a donc également l'ambition de servir de manuel pratique et didactique; il recherche l'audience de tous les acteurs des projets de construction en terre: des décideurs et planificateurs, des contrôleurs de travaux, des architectes et ingénieurs, des techniciens de tous niveaux, des entrepreneurs, des maçons et des tâcherons. Mais encore, des étudiants et chercheurs et du plus large public demandeur d'information.

Inévitablement, la volonté de classification et de simplification de cet ouvrage, conçu pour aller à l'essentiel à divers niveaux, renverra certains lecteurs à une demande d'information plus poussée. Les nombreuses références bibliographiques renvoient cette demande à une consultation d'ouvrages plus spécifiques ou à une consultation des auteurs de ce livre.

Nous espérons que ce livre soit inspirateur d'une formation indispensable et d'une pratique efficace et démonstrative.

Les auteurs, Bruxelles, Février 1985.

Houben Hugo

Guillaud Hubert

TABLE DES MATIERES

100 CONSTRUCTION EN TERRE

Depuis près de 10 000 ans que les hommes bâtissent des villes, la terre crue a été et demeure, à travers les traditions historiques et populaires, un des principaux matériaux de construction utilisés sur notre planète. C'est ainsi que plus d'un tiers des habitants de notre planète vit aujourd'hui dans des habitats en terre.

Construire en terre, c'est construire avec un matériau que l'on foule aux pieds tous les jours. Mais la terre ne peut être employée en construction que si elle offre une bonne cohésion propre, principalement due à la présence d'argile qui joue le rôle de liant naturel.

L'architecture de terre est véritablement un témoignage vivant de l'histoire et de la culture des peuples, en maintes contrées dont les paysages familiers en sont très souvent richement marqués.

De la tradition de construire en terre,on dénombre de très nombreux modes de construction avec une infinité de variantes traduisant l'identité des lieux et des cultures. On connaît principalement 12 modes d'utilisation de la terre en construction. Parmi ceux-ci, 7 sont très couramment employés et constituent les genres techniques majeurs.

ADOBE : la brique séchée au soleil est plus communément connue sous le nom d'adobe. Les briques d'adobe sont moulées à partir d'une terre maléable souvent adjuventée de paille. A l'origine ces briques étaient formées à la main. Plus tard (et jusqu'à présent), elles seront fabriquées manuellement à l'aide de moules prismatiques en bois ou en métal. Actuellement, on utilise également des machines.

PISE : la terre est comprimée en masse dans des banches, couche par couche, et banchée par banchée avec un pilon. Traditionnellement ces outils sont en bois.

TERRE-PAILLE : pour cette technique, la terre utilisée doit avoir une bonne cohésion. Elle est dispersée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'un liquide épais homogène, que l'on verse sur de la paille, jusqu'à former un film sur chaque brin. Au séchage, on obtient un matériau dont la texture est essentiellement celle de la paille. La durabilité de la terre-paille est remarquable.

TORCHIS : une structure en colombages et hourdée de claies est couverte avec une ou plusieurs couches de terre. Cette terre argileuse, amendée de paille ou autres fibres, assure l'étanchéité et l'isolation de la bâtisse.

FACONNAGE : cette technique ancestrale est toujours utilisée abondamment. La terre est façonnée de la même façon que pour la technique de poterie, sans outils.

BLOCS COMPRIMES : pendant longtemps on a fabriqué des blocs de terre à l'aide de moules dans lesquels on comprimait la terre à l'aide d'un petit pilon ou en rabattant avec force un couvercle très lourd. Ce procédé a été mécanisé et aujourd'hui on utilise des presses de toutes sortes. La gamme de presses et de produits obtenus sont extrêmement variés.

BAUGE : ce procédé consiste à empiler des boules grossières de terre, les uns sur les autres et de les entasser légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à en faire des murs monolithiques. Usuellement, la terre est amendée de fibres de natures diverses.

Aujourd'hui, ce sont les techniques de l'adobe, du pisé et du bloc comprimé qui sont les plus à l'honneur et abordés à un très haut niveau de recherche scientifique et technologique. On peut regretter que ces 3 genres techniques majeurs s'imposent au détriment des autres genres dont l'intérêt n'a pas été encore épuisé.

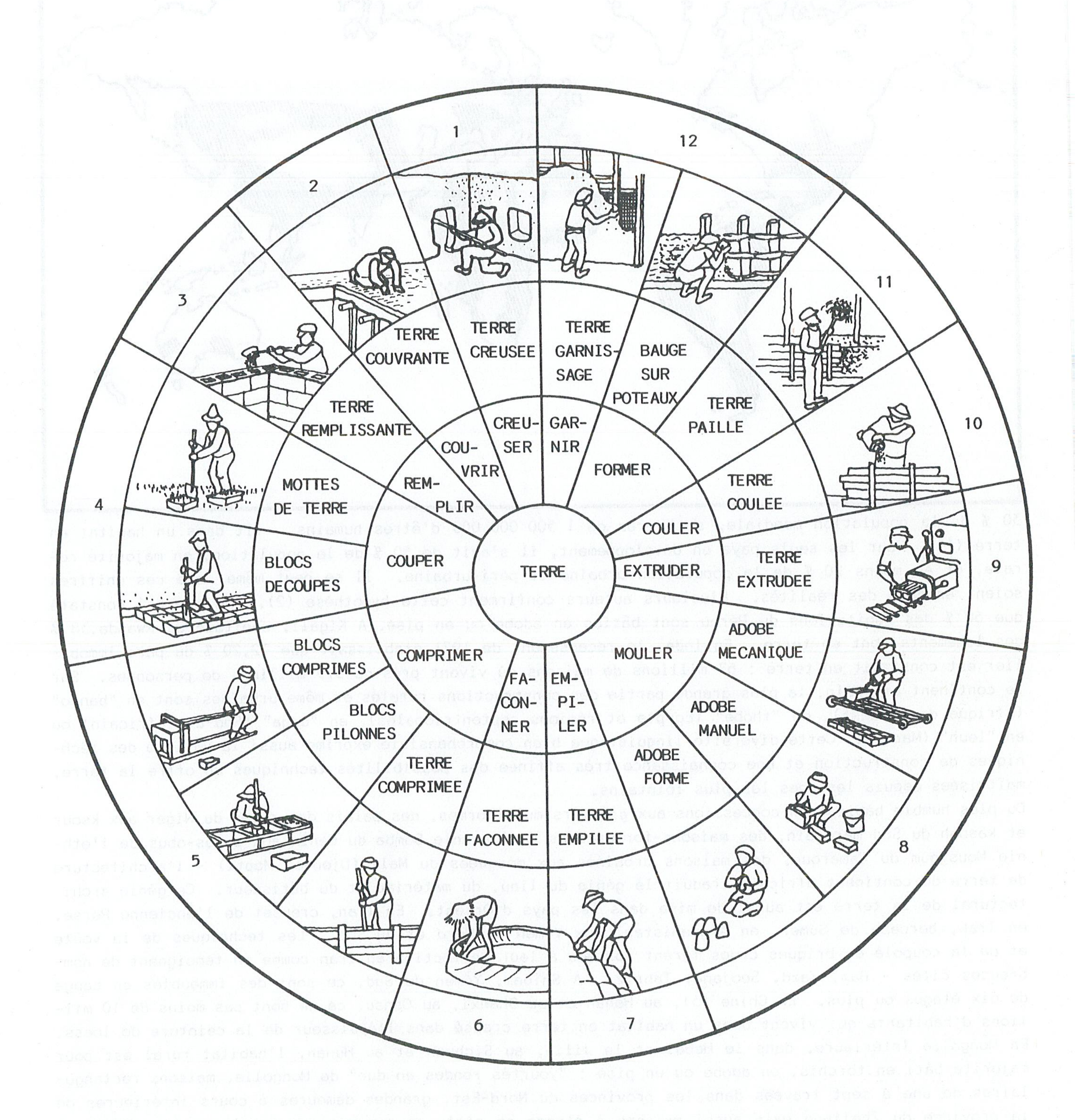
GRANDE DIVERSITE D'APPLICATIONS

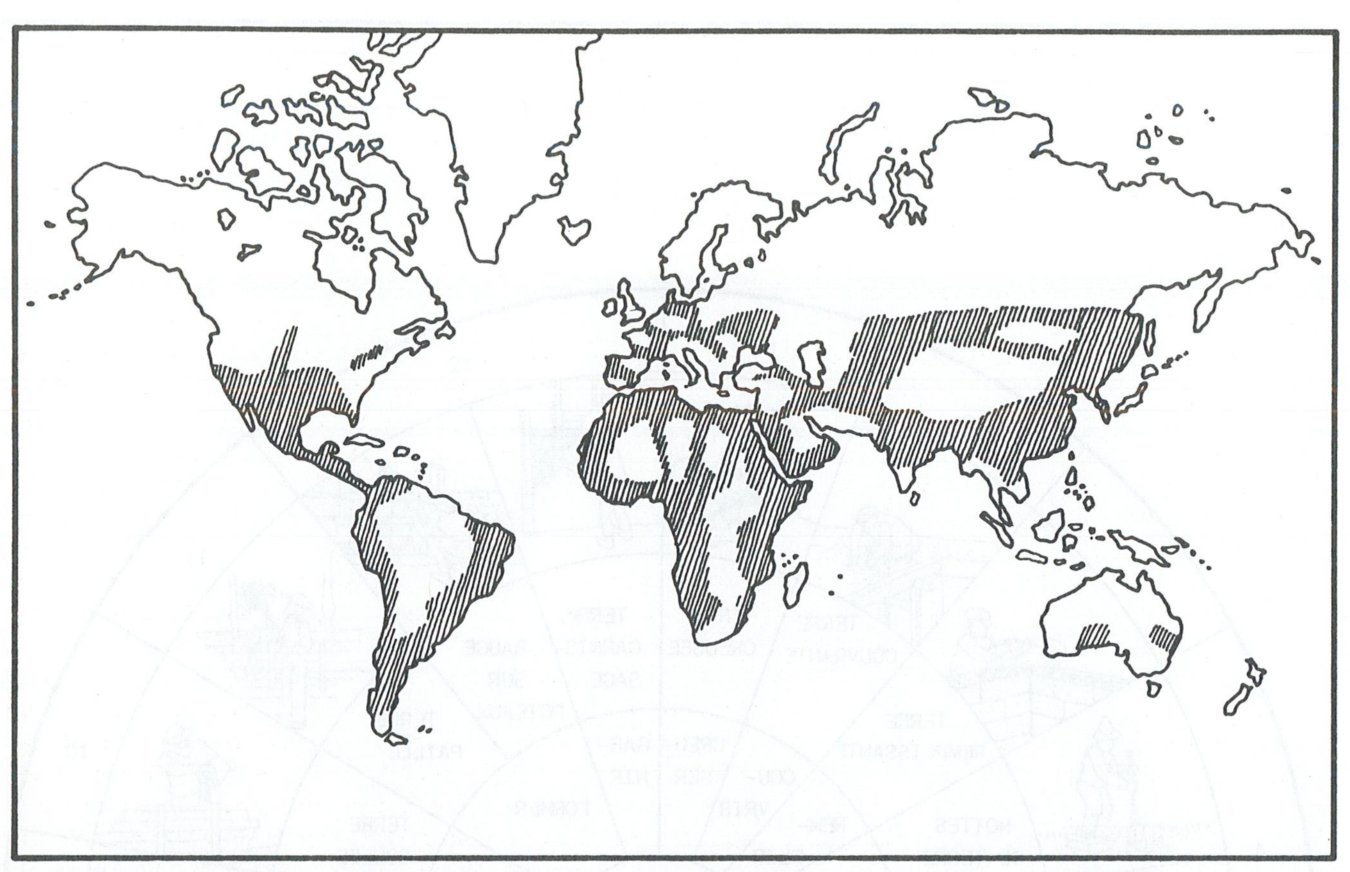
Les techniques de construction en terre évoquées sont très flexibles et autorisent la construction d'une grande variété de composants et de systèmes constructifs :

- Fondations
- Soubassement
- Murs et piliers
- Ouvertures
- PLanchers et pavements
- Toitures plates et inclinées
- Voûtes et coupoles
- Tuiles
- Eléments d'isolation
- Escaliers
- Cheminées
- Mobilier intégré
- Claustras
- etc ...

Ces éléments ne sont pas les seuls à pouvoir être fait en terre. On connaît aussi de très nombreuses applications extérieures au seul domaine de la construction de l'habitat :

- Canivaux
- Canaux et réservoirs
- Ponts et acqueducs
- Parking et pistes d'atterissage
- Routes
- Barrages
- etc ...

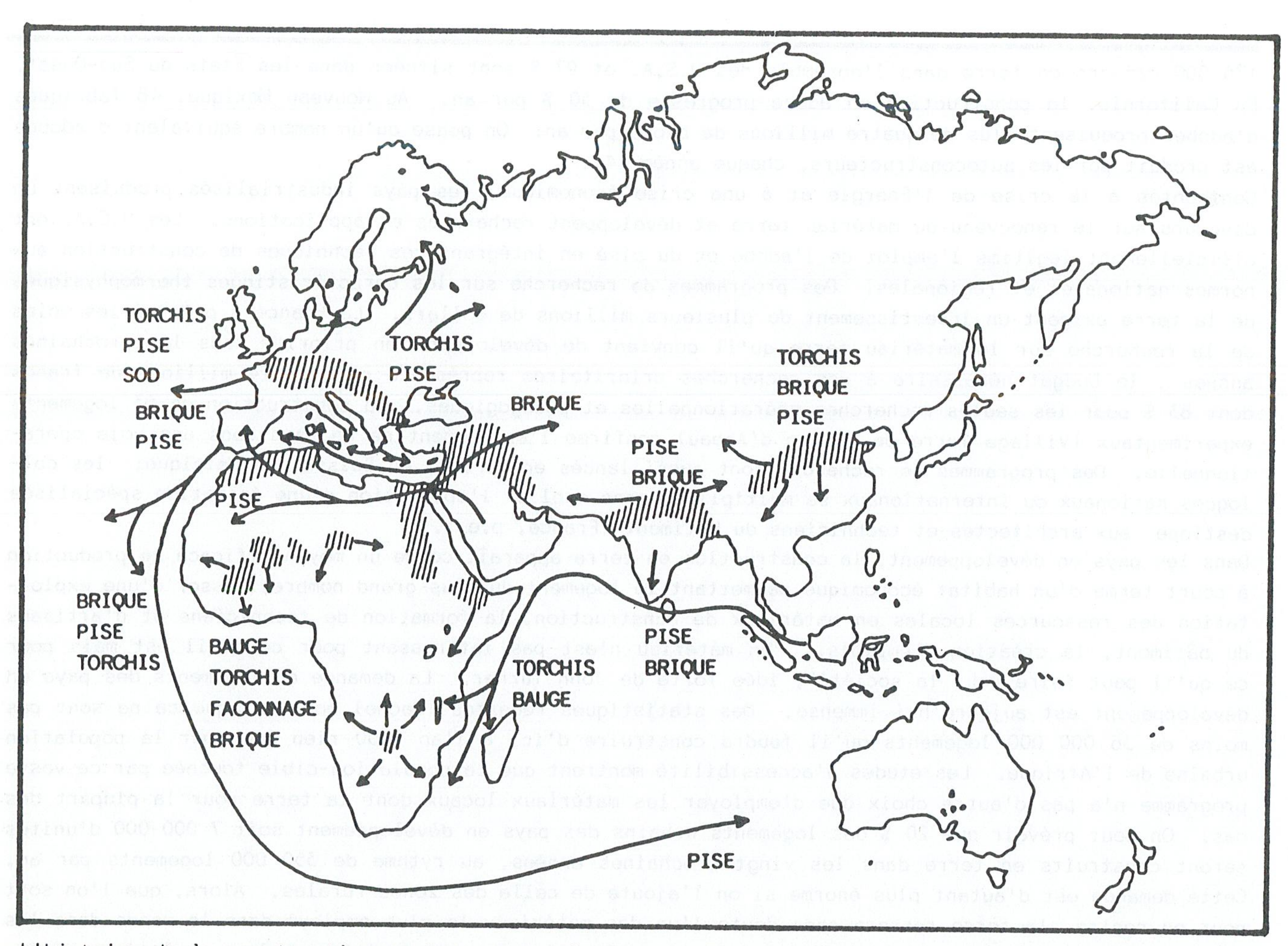

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
TERRE COUVRANTE
TERRE CREUSEE
TERRE GARNIS-SAGE
BAUGE SUR POTEAUX
TERRE PAILLE
TERRE COULEE
TERRE EXTRUDEE
ADOBE MECANIQUE
ADOBE MANUEL
ADOBE FORME
TERRE EMPILEE
TERRE FACONNEE
TERRE COMPRIMEE
BLOCS PILONNES
BLOCS COMPRIMES
BLOCS DECOUPES
MOTTES DE TERRE
TERRE REMPLISSANTE
CREU-SER
GAR-NIR
FORMER
COULER
EXTRUDER
MOULER
EM-PI-LER
FA-CON-NER
COMPRIMER
COUPER
REM-PLIR
COU-VRIR
TERRE



30 % de la population mondiale, soit près de 1 500 000 000 d'êtres humains, vit dans un habitat en terre (1). Pour les seuls pays en développement, il s'agit de 50 % de la population, en majorité rurale, et au moins 20 % de la population urbaine et péri-urbaine. Il se peut même que ces chiffres soient en-deçà des réalités. Plusieurs auteurs confirment cette hypothèse (2). On a ainsi constaté que 60 % des habitations du Pérou sont bâties en adobe ou en pisé. A Kigali, capitale du Rwanda,38 % des logements sont en terre. En Inde, le recensement de 1971 établissait que 72,20 % du parc immobilier est construit en terre : 67 millions de maisons où vivent près de 375 millions de personnes. Sur le continent africain, la plus grande partie des constructions rurales et même urbaines sont en "banco" (Afrique de l'Ouest), en "thobe" (Egypte et régions septentrionales), en "daga" (Sud-Est africain) ou en "leuh" (Maroc). Cette diversité linguistique bien compréhensible exprime aussi la variété des techniques de construction et une connaissance très affinée des possibilités techniques qu'offre la terre, maîtrisées depuis les âges les plus lointains.

Du plus humble habitat en concessions aux greniers multiformes, des palais des rives du Niger aux ksour et kasbah du Sud marocain, des maisons-forteresses de l'ethnie Somba du Bénin aux cases-obus de l'ethnie Mousgoum du Cameroun, des maisons urbaines aux mosquées du Mali (Djenné, Mopti) - l'architecture de terre du continent africain traduit le génie du lieu, du matériau et du bâtisseur. Ce génie architectural de la terre est aussi de mise dans les pays d'Orient. En Iran, creuset de l'ancienne Perse, en Irak, berceau de Sumer, en Afghanistan, aux Yémen du Nord et du Sud. Les techniques de la voûte et de la coupole en briques crues furent portées à leur perfection en Iran comme en témoignent de nombreuses cités - Bam, Yazd, Seojane, Tabriz. A Shîbam, Yémen du Sud, ce sont des immeubles en bauge de dix étages ou plus. En Chine (3), au Henan et au Shanxi, au Gansu, ce ne sont pas moins de 10 millions d'habitants qui vivent dans un habitat en terre creusé dans l'épaisseur de la ceinture de loess. En Mongolie Intérieure, dans le Hebei et le Jilin, au Sichuan et au Hunan, l'habitat rural est pour majorité bâti en torchis, en adobe ou en pisé : "yourtes rondes en dur" de Mongolie, maisons rectangulaires de une à sept travées dans les provinces du Nord-Est, grandes demeures à cours intérieures de la province du Zhejiang mais aussi maisons à étages en pisé, en anneaux concentriques, des Hakka du Plateau Central (province du Fujian) dont la construction se perpétrait jusque dans les années 1954 - 1955. En Europe, l'habitat rural en terre fait partie du paysage de nombreux pays : Suède, Danemark, R.F.A. et R.D.A., Angleterre (région du Devon), Espagne et Portugal. En France, 15 % de la population, à majorité rurale, occupe des maisons en pisé, en adobe ou en torchis. On connaît aussi le fantastique développement de la construction en adobe dans le Sud-Ouest des U.S.A. On comptait en 1980 près de

176 000 maisons en terre dans l'ensemble des U.S.A. et 97 % sont situées dans les Etats du Sud-Ouest. En Californie, la construction en adobe progresse de 30 % par an. Au Nouveau Mexique, 48 fabriques d'adobes produisent plus de quatre millions de blocs par an. On pense qu'un nombre équivalent d'adobes est produit par les autoconstructeurs, chaque année (4).
Confrontés à la crise de l'Energie et à une crise économique, les pays industrialisés produisent un discours sur le renouveau du matériau terre et développent recherches et applications. Les U.S.A. ont officiellement légitimé l'emploi de l'adobe et du pisé en intégrant ces techniques de construction aux normes nationales et régionales. Des programmes de recherche sur les caractéristiques thermophysiques de la terre exigent un investissement de plusieurs millions de dollars. La France a précisé les voies de la recherche sur le matériau terre qu'il convient de développer en priorité dans les prochaines années : le budget nécessaire à ces recherches prioritaires représente près de 24 millions de francs dont 83 % pour les seules recherches opérationnelles et pédagogiques. La construction de 63 logements expérimentaux (Village Terre de l'Isle d'Abeau) confirme l'engagement de ce pays dans une voie opérationnelle. Des programmes de recherche sont aussi lancés en R.F.A., en Suisse, en Belgique; les colloques nationaux ou internationaux se multiplient sans oublier l'apparition d'une formation spécialisée destinée aux architectes et techniciens du bâtiment (France, p.e.).
Dans les pays en développement, la construction en terre apparaît comme un moyen efficace de production à court terme d'un habitat économique permettant le logement du plus grand nombre, l'essor d'une exploitation des ressources locales en matériaux de construction, la formation de techniciens et d'artisans du bâtiment, la création d'emplois. "Un matériau n'est pas intéressant pour ce qu'il est mais pour ce qu'il peut faire pour la société", idée forte de John Turner. La demande en logements des pays en développement est aujourd'hui immense. Des statistiques récentes (Cache) montrent que ce ne sont pas moins de 36 000 000 logements qu'il faudra construire d'ici à l'an 2000 rien que pour la population urbaine de l'Afrique. Les études d'accessibilité montrent que la population-cible touchée par ce vaste programme n'a pas d'autre choix que d'employer les matériaux locaux dont la terre pour la plupart des cas. On peut prévoir que 20 % des logements urbains des pays en développement soit 7 000 000 d'unités seront construits en terre dans les vingt prochaines années, au rythme de 350 000 logements par an. Cette demande est d'autant plus énorme si on l'ajoute de celle des zones rurales. Alors, que l'on soit pour ou contre, la terre restera sans doute l'un des matériaux le plus employé dans le monde dans les années à venir. Ce qui n'était jusqu'alors qu'une simple et pure nécessité pour les populations défavorisées pourrait bien devenir un choix délibéré. On peut en effet relever l'attitude exemplaire du Pérou précisée par le journal Correo du 31 janv. 1978 : "L'adobe sera la vedette de la construction péruvienne". De même dans le journal malien L'essor, en 1980, où l'on pouvait relever l'urgence "de renverser la tendance actuelle en matière de construction (...) et de mettre sur pied des programmes de logements et d'urbanisation réalistes faisant appel à la terre, à l'eau, au soleil, et surtout à l'homme malien." En témoignage aussi cette déclaration de Madame Indira Gandhi, en 1980 : "Tous les bâtiments modernes entraînent une grande dépense d'énergie. (...), ce n'est pas le cas des architectures traditionnelles. Les techniques nouvelles sont nécessaires (...) mais il faut adapter et améliorer les acquis."
Ainsi, l'emploi universel de la terre pour construire est aussi désormais une prospective universelle.



L'histoire de la construction en terre est mal connue. L'intérêt pour ce matériau jugé antique et médiocre était éclipsé par celui accordé à la pierre ou au bois, matériaux plus "nobles". C'est pourtant bien la terre qui fut associée aux époques décisives de la révolution urbaine et qui servait la quotidienneté autant que le prestige des plus glorieuses civilisations de l'antiquité. Les trouvailles archéologiques de maintes contrées en témoignent. Les strates du temps n'ont pas pu effacer les preuves accumulées, tout juste dissimulées. L'époque actuelle soigne ses vestiges : les ruines sont révélées et relevées, classées, protégées et restaurées. Plus l'on remonte le cours de l'histoire et plus la terre semble être le matériau privilégié de l'homme bâtisseur, des âges les plus lointains jusqu'à nos jours. La construction en terre fut indépendamment développée dans les principaux foyers connus de la civilisation : dans les vallées inférieures du Tigre et de l'Euphrate, le long du Nil, sur les rives de l'Indus et du Huanghe. Ces régions fertiles furent propices à l'installation des communautés de chasseurs-collecteurs qu'avait auparavant permis la révolution agricole.
Les terres alluviales sableuses et argileuses, mêlées à la paille des céréales cultivées fournirent le premier matériau de construction solide et durable imposé par la sédentarisation des peuples : la brique de terre crue. Mais avant cette époque du Néolithique, les abris semi-fixes des peuples de chasseurs-collecteurs étaient en partie bâtis en terre. Les huttes de branchages recouverts de terre argileuse faisaient sans doute partie du paysage mésolithique (10000-5000 ans av. J.C.), époque de domestication du petit bétail. Auparavant, l'homme chasseur construisait des huttes de branchages recouverts de peaux de bêtes tels qu'en témoigent les sites d'Olduvai en Tanzanie ou de Molodova en Ukraine. Quels que furent les contacts entretenus par les différentes civilisations antiques pratiquant l'art de bâtir en terre, l'apparition de l'emploi de ce matériau fut sans doute propre à chaque contrée. Les résultats connus de l'archéologie autorisent tout à la fois une approche régionaliste et mondialiste et l'apport d'autres disciplines (Histoire, Anthropologie, Ethnologie) précise des directions d'influences culturelles par l'étude de la migration des peuples, de leurs contacts guerriers ou culturels. Ces liens supposés ou confirmés permettent d'évaluer, avec prudence, les possibilités d'une transmission des techniques de construction. On évoquera ici les grands foyers de civilisation, succintement, en restituant une infime partie du matériel d'étude disponible.

AFRIQUE

Le rôle joué par le continent africain dans l'évolution humaine fut considérable. C'est en Afrique que l'on situe l'apparition même de l'homme (Rift Valley, gorge d'Olduvai). C'est aussi en Afrique que s'est épanouie la civilisation égyptienne durant près de trois millénaires. Aux premiers établissements humains des sites de Merimdé et de Fayonni (delta du Nil), datés du V° millénaire av. J.C., correspond un habitat de clayonnages de roseaux et de branchages enduits d'argile ou remplis de mottes de terre. La civilisation se développe avec l'Egypte dynastique (2900 av. J.C.). La vallée du Nil fournit le principal matériau de construction : le limon argileux mêlé au sable du désert limitrophe et ajouté de paille des céréales cultivées. Le matériau est modelé puis moulé en briques crues qui sèchent sous le soleil. Les premiers mastabas funéraires royaux et des hauts fonctionnaires sont en briques de boue. Leurs murs extérieurs sont à redans, peut-être à l'imitation des ouvrages mésopotaniens. Les fouilles de Saqqarah et d'Abydos confirment une évolution vers des murs de briques talutés puis revêtus de pierres. La terre n'est pas éclipsée par la pierre, "matériau d'éternité", dont l'emploi est inauguré par la construction du sanctuaire de Saqqarah, bâti en calcaire par Imhotep. Mais la terre sera de plus en plus réservée à l'architecture civile, maisons rurales mais aussi demeures des nobles et vastes cités des plus grands rois. Les travaux de J.P. Lauer montrent que l'enceinte de pierre de Saqqarah imite les techniques et les formes de l'architecture traditionnelle en briques crues et en clayonnage de bois et d'argile. La terre est éternisée par la pierre. Le décor écrit ou peint des monuments funéraires confirme l'emploi de la brique crue jusqu'aux époques les plus récentes de la civilisation égyptienne. Mais les traces archéologiques sont rares car le matériau a mal résisté au temps. Les principaux vestiges sont légués par le site de Tell el-Amarna, en Moyenne Egypte et par la nécropole de Thèbes. Ce sont aussi les petites "maisons de l'âme" en poterie, trouvées dans les tombes qui témoignent de l'habitat populaire. Dans la cité de Tell el-Amarna, édifiée au cours du Nouvel Empire (1552-1070), on trouve des maisons d'artisans, de nobles, des palais et des temples, tous bâtis en briques crues. L'habitat modeste est souvent constitué de une ou de quelques pièces dont les murs de terre sont enduits à la chaux. Les riches demeures des nobles sont spacieuses : de vastes pièces de réception sont suivies de plusieurs chambres et d'un salon à colonne centrale, de commodités. En fond de jardin, les bâtiments annexes (hangars, écuries, cuisines) et les resserres des serviteurs, également en briques crues. A Deir el-Medinah, village des artisans de la nécropole de Thèbes, les maisons sont toutes mitoyennes, bâties en briques de boue sur des soubassements en pierres. L'habitat fait succéder en enfilade une pièce d'accueil, un séjour, une chambre et une cuisine. Un escalier donne accès à une terrasse. Ce village de briques crues a été occupé par des générations d'artisans royaux durant 400 ans. Les bâtisseurs égyptiens ont aussi développé l'art des voûtes en briques, visibles en Basse Nubie entre Louxor et Assouan (grenier du Ramesseum, vers 1200 av. J.C.). Quoique brillante, la civilisation égyptienne demeura très conservatrice et isolée. Elle n'eût finalement que peu d'influence sur les cultures d'Afrique qui développaient un habitat semi-fixe de huttes de branchages recouvertes d'argile ou toutes de terre. Les formes et les techniques sont multiples. Les régions septentrionales du continent africain ont été influencées par les civilisations méditerranéennes successives qui ont pu contribuer à la diffusion de la brique crue et du pisé. L'Afrique de l'Est était influencée par des peuples venus de l'Océan Indien (Mélanésiens) qui pratiquaient le torchis et le façonnage direct. La migration des peuples kouchites et le rayonnement du royaume d'Axum (III°-VIII° s ap. J.C.) depuis la Nubie jusqu'en actuel Kenya ont pu étendre l'emploi de la brique crue. Bien plus importante fut l'influence de l'Islam, à partir du XI° siècle, qui modifiait profondément l'aspect des anciennes cités africaines et qui introduisait l'architecture des mosquées. Celles-ci étaient pour majorité bâties en terre selon les techniques du lieu, en façonnage direct, en bauge ou en briques de terre. Parmi les plus beaux exemples, les mosquées de San, de Djenné ou de Mopti, au Mali, ont servi de modèles à quelques contrées voisines (Niger, Haute-Volta). Mais, malgré toutes les influences connues et possibles, le vaste continent africain a porté des cultures spécifiquement africaines qui maîtrisaient et achevaient l'art de bâtir en terre crue. Ces techniques étaient diffusées par le rayonnement des royaumes du Ghana (VIII° - XI° s.), du Mali des Malinké (XIII° s.), des Songhay (XIV°-XVI°s.) et des cités-Etats Hansa (X° - XIX° s.), parvenant jusqu'à nos jours.

Les plus anciens établissements d'Europe sont datés du VI° millénaire. L'habitat primitif des côtes de la Mer Egée, en Thessalie (Argissa, Néa-Nicomédia, Sesclo) est de clayonnage de bois et d'argile puis évolue vers des groupements de constructions carrées en briques crues. Sur le site de Sesclo, les habitations des niveaux supérieurs, en torchis et en briques séchées, sont de plan rectangulaire à un étage (4600 av. J.C.). Le plan évolue vers le type "mégaron" qui prédominera dans l'architecture grecque. Ce type d'habitat s'étend vers l'intérieur de l'Europe pour être remplacé dans les régions du Nord par des constructions en bois et en terre. C'est l'habitat des faciès culturels danubiens qui couvre l'Europe Centrale tout au long de l'Age du Bronze (1800-750 av. J.C.). Les fouilles de Köln-Lindenthal (Hollande) ont révélé des semis de cabanes de bois et de terre à quatre nefs parfois longues de 25 mètres pour une largeur de 8 mètres. Dans le monde égéen, sous la pression des envahisseurs doriens, au Bronze final, les fortifications mycéniennes se multiplient. L'appareil cyclopéen de pierre remplace la brique crue réservée à l'habitat protégé dans des acropoles (Tyrinthe). A cette même époque, le contexte insulaire de la Crète favorise le développement harmonieux de la civilisation minoenne. Les superbes palais de Cnossos, de Phaistos et de Mallia associent la brique crue au tuf, au gypse, au shiste, au marbre et au bois, matériaux fardés de rouge sombre, de bleu profond et de teintes ocres. Les fouilles entreprises à Acrotiri de Théra, île voisine de la Crète, et les célèbres maquettes en faïence du musée d'Héracleion, datées du minoen moyen (1900-1600) confirment l'importance du colombage dans l'architecture civile.

Les maisons à un ou deux étages sont à pans de bois hourdés de torchis ou de briques crues. Sur la péninsule grecque, les périodes obscures qui suivent les invasions doriennes (1100-700) sont marquées par un retour au clayonnage enduit de terre. Le VIII° siècle connaît une réorganisation politique en Etats régionaux. A Smyrne, les travaux de R.V. Nicolls montrent que l'habitat protégé par d'épaisses murailles en briques crues est de forme absidale. Ce sont des maisons ovales de 3 x 5 m aux murs de brique crue enduits à l'extérieur, sans fondations ni soubassements. Le mégaron absidal évolue vers le mégaron rectangulaire. Vers la fin du III° siècle, à Athènes, aux pieds de l'acropole resplendissant de Phidias, la cité s'étale en quartiers denses d'habitations bâties en briques crues, à toitures de tuile ou de chaume, d'apparence villageoise (d'ap. Dicéarque). L'emploi des briques "Pentadoron" et "Tetradoron" se perpétue au 1° siècle, constaté par Vitruve : "Les murs du temple de Jupiter et les chapelles de celui d'Hercule (...), la maison de Crésus "à Sardes ainsi que le palais du "puissant roi Mausole à Halicarnasse" sont bâtis en briques de terre crue. Sur les rivages de l'ancienne Phénicie, les premiers établissements sont datés du VIII° millénaire av. J.C. Les fouilles récentes (20 ans) des régions Sud de Syrie Occidentale semblent préciser une influence des cultures limitrophes (Jéricho-Munhata) qui développèrent très tôt la brique crue (site du tell de Ras Shamra). Avec l'apogée de la construction en pierre tyrienne (Tyr, Sidon, Ugarit), la terre fut alors réservée aux toitures plates, damée et roulée en couches successives sur un voligeage en bois ou pour les constructions rurales. Il semble que les bâtisseurs de ces contrées aient très tôt développé les coupoles en briques crues, en encorbellement, pour élever des silos à grain de forme conique. On ignore si la tradition du pisé, observable au Liban et en Syrie, connut des origines aussi lointaines. Mais cette technique de la terre coffrée fut employée pour construire les villes puniques lorsque les Phéniciens durent transférer leur civilisation sur les rivages de Méditerranée Centrale (création de Carthage en 820 av. J.C.). Pline en atteste l'emploi dans son Histoire du monde : "Que dirons-nous des murailles de pisé qu'on voit en Barbarie (Carthage) et en Espagne, où elles sont appelées murailles de forme, puisqu'on en forme la terre entre deux ais (...); il n'y a ciment ni mortier qui soit plus dur que cette terre; (...) les guettes et les lanternes qu'Hannibal fit construire en Espagne (...) sont de pisé." Les fouilles de Carthage, sur la colline de Byrsa, confirment la construction d'habitations en pisé. Au II° siècle av. J.C., les immeubles de six étages en terre damée et en briques crues, parfois chaulées ou plaquées de marbre, furent courants dans cette vaste cité de "700 000 âmes" (d'ap. Strabon).

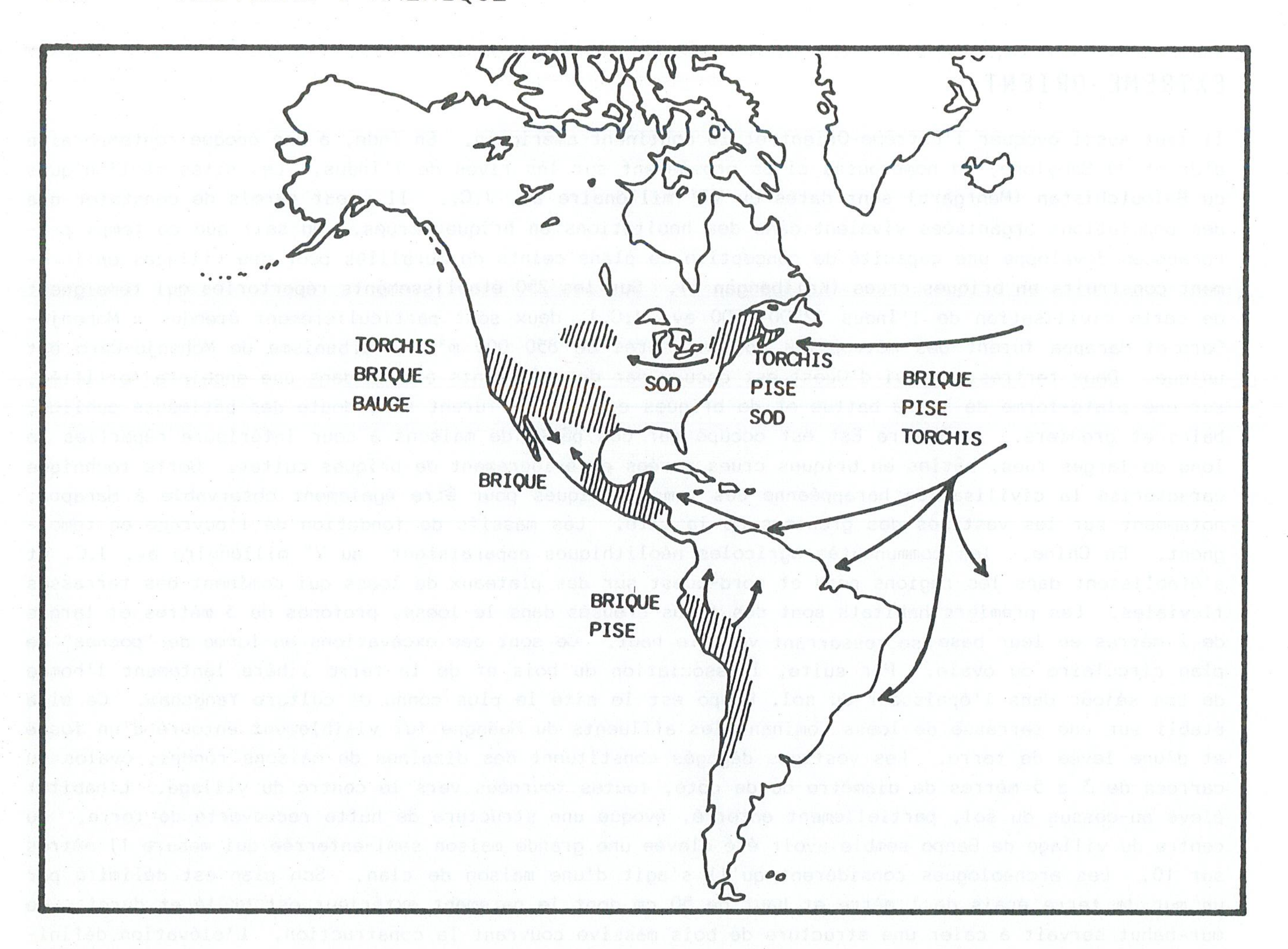
Rome qui n'est au début du VI° siècle qu'une bourgade agricole est prise par le courant hellénique indirectement transmis par la domination étrusque. L'habitat de huttes de bois enduites de terre et couvertes de chaume du site des sept collines laisse peu à peu place à un habitat de maisons rectangulaires aux murs de brique crue. Ce matériau est employé pour les premiers édifices sacrés et publics de la République (IV° et III° s.) mais sera vite remplacé par le tuf et le marbre, puis par le travertin qui sera le matériau de prestige de la Rome impériale. La brique crue (lidio) demeure le matériau des maisons modestes et des logements populaires de Rome, jusqu'aux époques augustéennes. Vitruve l'évoque dans son "De Architectura". L'auteur accorde une grande considération à ce matériau :"de la plus grande utilité car (il) ne charge pas les murs." Il en préconise volontiers l'emploi : "pourvu qu'en construisant on apporte les soins nécessaires pour l'établir comme il faut." Mais la brique crue fut repoussée "hors la ville" par des lois qui interdisaient des murs épais. Sur les territoires celto-gaulois, l'Age du Fer (750-50) avait développé un habitat en oppidum, petites maisons de bois et de torchis, de bauge. En Gaule méditerranéenne, les influences helléniques et carthaginoises avaient introduit la brique crue et le pisé, confirmés par les fouilles des sites de La Lagaste et d'Entremont, par les observations de Vitruve à Massalia (Marseille). Avant la diffusion de la brique cuite et du blocage par les romains, la Gaule Cisalpine fit grand emploi de la terre crue dans la construction rurale et même urbaine : les fouilles de Lyon (Lugdunum) restituent un hourdage d'ossatures bois en briques crues et en torchis. Le terme latin "pinsare" qui désigne l'acte de piser laisse supposer que cette technique fut connue des romains mais les fouilles en font peu cas. Les périodes obscures du Haut Moyen Age voient un retour des constructions rudimentaires de bois long fendus et de torchis. Ces techniques furent prédominantes en milieu rural jusqu'au Bas Moyen Age lorsque l'art achevé de la charpenterie introduisit le colombage à bois court hourdé de torchis ou de briques. Mais ce n'est qu'au cours du XVIII° et tout au long du XIX° siècle que l'on peut resituer un renouveau des habitats massifs en terre crue, bauge, pisé et briques, dans la plupart des régions rurales des pays européens. En France, les idées du Siècle des Lumières transmises par la pensée physiocrate soucieuse d'améliorer les conditions de vie misérables des campagnes, contribuent largement à une progression du pisé. Un certain François Cointeraux fut le propagateur enthousiaste de cette technique permettant la construction d'un habitat économique, sain et durable. Ses écrits (pas moins de 72 fascicules) furent traduits en plusieurs langues et diffusés en Allemagne, au Danemark, en Amérique et même en Australie et ne sont sans doute pas étrangers à la diffusion de cet art de bâtir dans ces pays. En Europe, la construction en terre perdure jusque dans les années 1950 ayant connu un renouveau étonnant aux lendemains de la Seconde Guerre Mondiale, période de pénurie en matériaux industrialisés et de relogement massif des populations sinistrées. L'Allemagne développait systématiquement ces techniques en créant de véritables centres de formation; ce sont plusieurs milliers d'habitations qui furent construites en terre. Depuis lors, ces techniques n'ont pas résisté au modernisme. Mais aujourd'hui, dans ces pays, la facture énergétique relance un débat, des recherches et des applications sur la construction en terre.

MOYEN-ORIENT

Au Proche-Orient, les fouilles révèlent nombre d'indices sur l'évolution de l'habitat en terre de ces contrées, depuis le Néolithique. Jéricho s'étend sur quatre hectares. Les habitations les plus anciennes (8000 ans av. J.C.) sont rondes : des soubassements de pierre sont couronnés de murs en briques crues en forme de pains modelés à la main. A Mureybet, en Syrie, les niveaux supérieurs révèlent des constructions quadrangulaires en briques de terre, jouxtées en damier. Le site de Tell Hassuna, en Irak Méridional, semble confirmer le moulage des premières briques parallélépipédiques. L'époque obeidienne (5000-3200 av. J.C.) annonce une architecture de terre monumentale, celle des futures villes-temples de l'époque d'Uruk (3200-2800 av. J.C.). Les premiers sanctuaires du culte élevés au cours du III° millénaire (temple d'Eanna à Uruk, temple d'Enki à Eridu) sont en briques bâties à l'état pâteux, sans mortier. A Ur, les maisons en terre sont à cour intérieure à ciel ouvert desservant les pièces d'habitation sur deux niveaux. A Assur et à Mari, l'architecture des palais de la période d'Isin - Larsa (2015-1560 av. J.C.) exhibe des murailles en briques crues multipliant les redans. L'Assyrie domine le Proche-Orient jusqu'au VI° s. av. J.C.. Ninive aux immenses murailles percées de quinze portes est toute de terre. Dans le palais de Sargon II, à Khorsabad, la brique crue est associée aux matériaux les plus fins : l'ivoire, le sental, l'ébène, le tamaris, le marbre et le basalte, l'or et l'argent. Les galeries du palais sont voûtées : des berceaux clavés en briques crues à dévers prononcé. Babylone perpétue cette tradition de la construction en terre. La célèbre Porte d'Ishtar parée de reliefs émaillés bleutés ouvre une voie processionnelle qui conduit au sanctuaire de Marduk où domine de ses 90 mètres de haut la ziggourat Etemenanki. Les babyloniens furent les précurseurs de la technique de la terre armée : des câbles de roseaux torsadés, épais d'un bras,s'entrecroisent et traversent les noyaux de briques crues des ziggourats. Contemporaine de Sumer, la civilisation d'Elam se développe dans le Sud-Ouest iranien et connaît un rapide essor. Sur les territoires élamites qui réunissent les plaines du Khuzistan et des plateaux argileux s'élevant en terrasses, la terre s'impose très tôt comme le principal matériau de construction. L'architecture en briques crues de Suse n'a sans doute rien à envier aux cités de Mésopotamie, ni la ziggourat de Tchoga-Zanbil qui devait culminer à près de 53 m de haut. Les époques des invasions Indo-aryennes du II° millénaire ne lèguent que peu de vestiges, jusqu'à ce que s'impose la domination des Mèdes (IX°-VI° s. av. J.C.). Les centres religieux et administratifs de la Médie sont ceints d'épaisses murailles en briques crues aux redans élancés. A Ecbatane capitale des Mèdes ensevelie sous l'actuelle Hamadan, on constate l'emploi de la brique crue en murs et piliers porteurs. Les briques séchées étaient bâties au mortier d'argile. Les conquêtes de Cyrus le Grand et de ses successeurs étendent les frontières de l'Empire Perse Achéménide jusqu'aux rives de l'Indus, en Anatolie, en Egypte et en Lybie. L'architecture de Pasargades (546 av. J.C.) associe les colonnes de pierre aux murs de briques crues et établit les principes de la salle hypostyle. A Persépolis, tous les bâtiments disposent de hautes salles à colonnes flanquées de galeries et de vestibules à portiques. Les ruines sont impressionnantes malgré l'effondrement de nombreux fûts de colonnes et des toitures de cèdre, malgré la disparition des murs de briques crues revêtus de placages de pierre polie qui s'élevaient entre les portes massives aux énormes linteaux à gorge égyptienne. Les fortifications des cités achéménides telles celles de Suse sont élevées en terre. L'art de construire des Perses trouvera sa perfection avec la maîtrise des techniques de la voûte et des coupoles. Les voûtes sont bâties en tranches de berceaux inclinés et les coupoles sont dressées sur trompes ou sur pendentifs. La voûte et la coupole ne furent pas réservées à l'architecture palatiale et se multiplièrent dans la construction civile, traversant toutes les époques jusqu'à l'Iran actuel. Combien de sites fortifiés, de cités abandonnées aux habitations fantômes (place forte de Bam au Sud-Est de l'Iran), de villes actuelles (Tabriz, Seojane, Ispahan) qui témoignent de la vigueur de cette architecture de terre crue persane.

EXTREME-ORIENT

Il faut aussi évoquer l'Extrême-Orient et le continent américain. En Inde, à une époque contemporaine d'Ur et de Babylone, de nombreuses cités prospèrent sur les rives de l'Indus. Les sites néolithiques du Baloutchistan (Mehrgarh) sont datés du VI° millénaire av. J.C.. Il y est permis de constater que des populations organisées vivaient dans des habitations en briques crues. On sait que ce temps pré-harappéen développe une capacité de conception de plans ceints de murailles pour des villages entièrement construits en briques crues (Kalibangan I). Sur les 250 établissements répertoriés qui témoignent de cette civilisation de l'Indus (2500-1800 av. J.C.), deux sont particulièrement étendus : Mohenjo-Daro et Harappa furent des métropoles couvrant près de 850 000 m². L'urbanisme de Mohenjo-Daro est unique. Deux tertres; celui d'Ouest est occupé par des bâtiments élevés dans une enceinte fortifiée, sur une plate-forme de terre battue et de briques crues. Ce furent sans doute des bâtiments publics, bains et greniers. Le tertre Est est occupé par des pâtés de maisons à cour intérieure réparties le long de larges rues, bâties en briques crues parées extérieurement de briques cuites. Cette technique caractérise la civilisation harappéenne des temps védiques pour être également observable à Harappa, notamment sur les vestiges des greniers de la cité. Les massifs de fondation de l'ouvrage en témoignent. En Chine, les communautés agricoles néolithiques apparaissent au V° millénaire av. J.C. et s'établissent dans les régions nord et nord-ouest sur des plateaux de loess qui dominent des terrasses fluviales. Les premiers habitats sont des trous creusés dans le loess, profonds de 3 mètres et larges de 2 mètres en leur base se resserrant vers le haut. Ce sont des excavations en forme de "poches" de plan circulaire ou ovale. Par suite, l'association du bois et de la terre libère lentement l'homme de son séjour dans l'épaisseur du sol. Banpo est le site le plus connu de culture Yangshao. Ce site établi sur une terrasse de loess dominant les affluents du Huanghe fut visiblement entouré d'un fossé et d'une levée de terre. Les vestiges dégagés constituent des dizaines de maisons rondes, ovales ou carrées de 3 à 5 mètres de diamètre ou de côté, toutes tournées vers le centre du village. L'habitat élevé au-dessus du sol, partiellement enterré, évoque une structure de hutte recouverte de terre. Au centre du village de Banpo semble avoir été élevée une grande maison semi-enterrée qui mesure 11 mètres sur 10. Les archéologues considèrent qu'il s'agit d'une maison de clan. Son plan est délimité par un mur de terre épais de 1 mètre et haut de 50 cm dont le parement extérieur est brûlé et durci. Ce mur-bahut servait à caler une structure de bois massive couvrant la construction. L'élévation définitive de l'habitat en bois et en terre au-dessus du sol ainsi que le passage au plan rectangulaire se précisent sous la dynastie Shang (XVIII°-XII° s. av. J.C.). Les villes Shang sont ceintes de fortifications en terre damée et les palais Yin de cette époque sont élevés sur des plates-formes en terre damée (fouilles de Zhengzhan et de Anyang). Ce sont des maisons en longueur à armature de bois cloisonnées de torchis tassé et durci au feu. Ces principes sont conservés sous la dynastie Zhou (XII°-V° s.). Durant la période des Royaumes Combattants (V°-III° s.) est commencée la construction de la Muraille de Chine dont plusieurs tronçons sont réalisés en terre damée. Cet ouvrage long de 6 000 km sera achevé par les souverains Ming (XV°-XVII° s. ap. J.C.).
L'apparition de la brique crue en hourdage de structures en bois ou en ouvrages porteurs semble remonter à l'époque de la dynastie des Han (III° s. av. J.C.-III° s. ap. J.C.). Cette technique est employée dans l'architecture urbaine sous les Han Orientaux (I°-III° s.). La ville chinoise adopte un plan carré divisé en secteurs carrés occupés par des palais et des quartiers résidentiels; les portes de la ville sont percées dans une fortification en terre battue. Pékin conserva une double fortification en terre jusqu'en 1950. Depuis les époques Ming jusqu'à nos jours, l'architecture chinoise perpétue la construction en bois hourdée de torchis ou de bauge et en briques crues. Il semble par ailleurs que les chinois aient développé la construction en pisé depuis l'époque des Trois Royaumes (221-581 ap. J.C.). La terre damée en coffrages ou dans de longs fûts de bois fendus maintenus par des perches fichées dans le sol, permit la réalisation de fermes fortifiées à plusieurs étages, de plan rectangulaire ou circulaire. Cette tradition est encore observable chez les Hakka du Plateau Central.



Sur le continent américain, la vie nomade des groupes de chasseurs-collecteurs dure plusieurs milliers d'années avant que ne soit expérimentée l'agriculture. C'est en Amérique Centrale que la culture du maïs permet la création des premiers villages permanents. En Mésoamérique, c'est au cours de la deuxième moitié de la période Formative (1200 av. J.C.-300 ap. J.C.) que de nombreux foyers de civilisation se dotent d'une organisation complexe autour d'un urbanisme de centres religieux. Les Olmèques (Tres Zapotes-La Venta) et les Zapotèques (Monte Alban) atteignent ce stade dès 800 av. J.C. Le site de la Venta est dominé par une pyramide de terre large de 65 mètres qui culmine à 35 mètres de haut. L'habitat semble avoir été un système ouvert de petites maisons quadrangulaires élevées en matériaux légers : bois et torchis ou boules de terre, couvertures de palmes. L'emploi de la brique crue apparaît entre 500 av. J.C. et 600 ap. J.C. selon le degré de complexité et de hiérarchisation des sociétés. La pierre est utilisée en parement des teocalli, tumulus de terre surhaussés de sanctuaires. Durant la période classique (300-900 ap. J.C.), à Testihuacan, la pyramide du Soleil élevée sur une base carrée de 225 m de côté se hausse jusqu'à 63 mètres. Cet ouvrage paré de pierre de lave est construit autour d'un noyau de terre damée qui représente deux millions de tonnes de matériau mis en oeuvre. Les temples qui bordent la "Chaussée des Morts", longue de 4 km, sont conçus sur le même principe. A l'écart du centre cérémoniel, les fouilles ont restitué plusieurs zones d'habitat dense. Des vestiges de soubassements maçonnés, arasés, permettent de penser que les murs supérieurs furent de brique crue et enduits à la chaux. Au XII° siècle, les Aztèques occupent les îlots marécageux du lac Texcoco (site de Mexico) et érigent peu à peu leur capitale Tanochtitlan, cité splendide décrite par les chroniqueurs contemporains de la conquête espagnole, déployant quatre régions administratives autour d'un centre culturel. Les quartiers résidentiels s'étendent sur près de 1 000 hectares. Les palais superposent un niveau administratif et un niveau de résidence et de réception. Les maisons aux enduits colorés sont d'un seul niveau à toitures terrasses; volumes épurés pour la plupart construits en briques crues, blanchis à la chaux. La pierre est réservée aux palais, aux édifices du culte et aux ouvrages de défense. Tenochtitlan, ville superbe de pierre et de terre est anéantie par les troupes de Hernan Cortez, en 1521.

En Amérique andine, hors des régions de montagnes pourvues en pierre, dans les plaines fluviales et côtières, c'est l'emploi de la terre qui prédomine. Les plus anciennes huaca de l'aire andine (totoms funéraires) sont des tas de pierres puis des pyramides conçues sur le principe d'une enveloppe de briques crues remplie de galets et arasée en terre damée (Rio Seco, 1600 av. J.C.). A l'époque de Chavin (1000-200 av. J.C.), l'enceinte de stèles gravées du site de Cero Sechin cerne un temple en briques crues de forme conique. L'emploi de la terre est massivement développé par la civilisation littorale des Mochicas (II°-VIII° s. ap. J.C.). Les canaux d'irrigation mochicas sont de véritables digues-aqueducs en terre damée et en briques crues. Le long du fleuve Moche se dressent les plus grandes pyramides jamais construites en briques crues : la Huaca del Sol et la Huaca de la Luna. Leur structure interne est constituée de piliers rapprochés en briques crues parallélépipédiques. Au XI° siècle, la capitale de l'empire Chinu, Chan Chan est entièrement construite en briques séchées. Cet ensemble ceint d'une énorme muraille de terre s'étend sur près de 20 km² et comprend une douzaine de palais murés. Dans le quartier Von Tschudi, les murs d'adobe sont ornés d'une structure en treillis et de reliefs zoomorphes en argile moulée. A l'apogée des Incas (1493-1525), la plupart des cités de montagne (Cuzco, Pisac, Machu Picchu) sont bâties en appareil de blocs cyclopéens mais la terre est employée sur le littoral andin. Dans la vallée du Rio Pisco, la cité de Tambo Colorado est toute de brique crue cubique. Les murs sont enduits d'argile vivement colorée de rouge ou de jaune. La grande majorité de l'habitat rural fut sans doute de terre, jusqu'aux maisons des curaca (chefs de village) et des tucricuc (administrateurs). Dans la vallée du Rimac, de riches demeures en adobe et en tapià (pisé) ont été récemment restaurées. Aujourd'hui, en Amérique centrale comme en Amérique latine, l'adobe et la tapià demeurent les matériaux dominants.

En Amérique du Nord, les cultures indiennes du Sud-Ouest développèrent très tôt l'emploi de la terre pour construire. Les maisons-fosses des Hohakam (Snaketown, Arizona) sont à structure de bois recouverte de terre (période Colonial, 500-1100 ap. J.C.). Sous l'impulsion des Anasazi (1100-1450), les Hohokam érigent un habitat en surface puis à étage, entièrement en terre. Le site de Casa Grande montre des murs dressés en levées de bauge longues de 1,50 m, épaisses de 1,20 m et hautes de 60 cm. La tradition culturelle Mogollon développe un habitat de forme typique que l'on a associé à celle d'une courte pipe à fourneau cylindrique, en bois et recouvert de terre. Mais c'est la culture Anasazi qui constitue l'héritage commun à de nombreuses tribus indiennes du Sud-Ouest des U.S.A. (Hopis, Zunis, Acomas, Pueblos), qui lègue le plus de vestiges.

La période Basket Maker I et II (0-500 ap. J.C.) est marquée par un habitat de maisons-fosses circulaires (Shallow- Pithouses), en perches de bois et branches tapissées de terre. Avec la séquence Basket Maker III (500-700), le plan devient rectangulaire et la forme en pyramide tronquée en son sommet, toujours de bois et de terre (Mesa Verde). Avec les phases Pueblo I et II (700-1100), la structure en bois des habitants de surface devient plus solide et les murs sont dressés en torchis (Wattle houses) ou en boules de terre comblant les espaces intersticiels de l'ossature (Jacal houses). Après le rayonnement des sites de Canyons de Nouveau Mexique (Mesa Verde, Chaco Canyon; 1100-1300), les Anasazi migrent vers d'autres sites de mesas ou de vallée. Le long du Rio Grande et du Rio Puerco, les terres limoneuses et sableuses des terrasses alluviales fournissent le matériau de base. L'architecture des Pueblos témoigne de cette parfaite maîtrise de la brique crue. A Taos, les habitations empilées configurent une forme pyramidale à degrés. Les murs d'adobe sont enduits de terre mêlée de paille finement hachée, boules de terre jetées et lissées à la main. Les toitures à vigas couvertes de brindilles sont recouvertes de terre damée. Cet habitat très élaboré a servi de modèle à l'architecture hispano-mexicaine en adobe qui fut depuis lors réalisé dans ces régions du Sud-Ouest des U.S.A. Aujourd'hui, la brique d'adobe et le pisé sont associés au fantastique développement que connaît l'architecture solaire, dans l'ensemble de ces contrées.

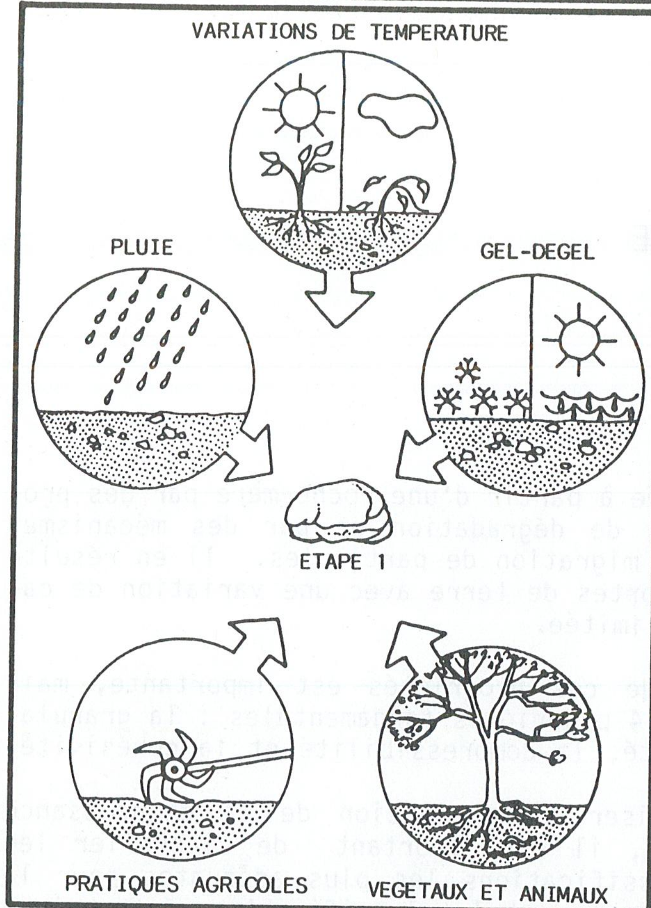
- Danzhen Liu. La maison chinoise. Paris, Berger Levrault, 1980.
- Encyclopedie d'archéologie de Cambridge. Paris, éditions du Fanal, 1981.
- Galdieri, E. The use of raw clay in historic buildings: economical limitation of technological choice ? In IIIrd International symposium on mud brick (adobe) preservation, Ankara, Icom-Icomos, 1980.
- Le grand atlas de l'architecture mondiale. Paris, Encyclopédia Universalis, 1981.
- Le grand atlas de l'histoire mondiale. Paris, Encyclopédia Universalis, 1981.
- Smith, E. Adobe bricks in New Mexico. Socorro, New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, 1982.
- Uppal, I.S. Des abris durables et bon marchés. In Bâtiment Build International, Paris, CSTB, 1972.

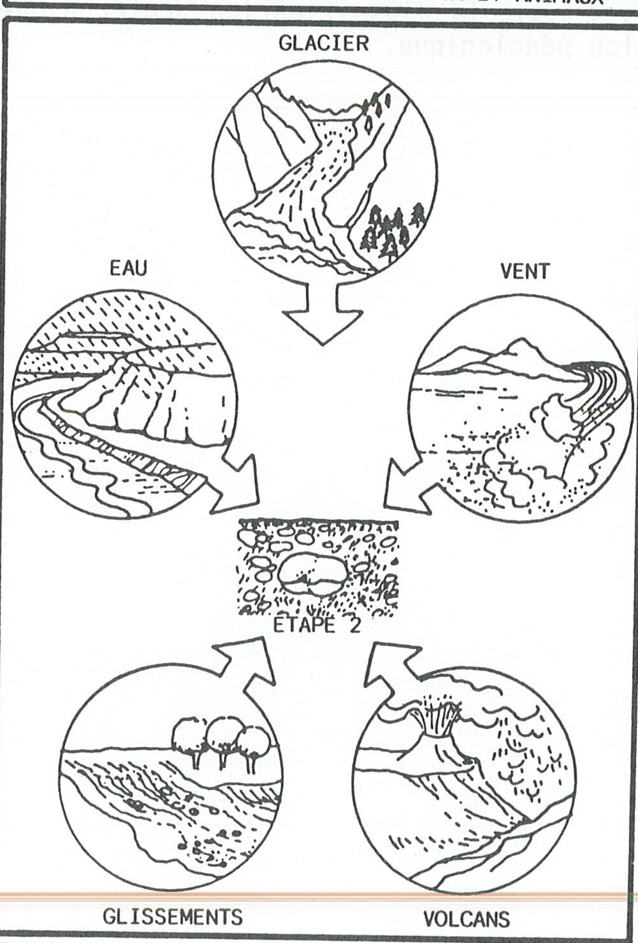
200 LA TERRE

La terre est formée à partir d'une roche-mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de sortes de terre avec une variation de caractéristiques illimitée.

La connaissance de ces propriétés est importante, mais surtout celle des 4 propriétés fondamentales : la granularité, la plasticité, la compressibilité et la cohésivité.

Afin de rationaliser l'exploitation de la connaissance de ces propriétés, il est important de classifier les terres. Les classifications les plus adéquates pour la construction en terre sont la classification géotechnique et la classification pédologique.





DEFINITION

Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre. A la surface du sol, la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux. Elle résulte de la transformation de la roche-mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques liés aux conditions bioclimatiques et à la vie animale et végétale.

La formation et l'évolution d'un sol s'opèrent selon trois processus, plus ou moins simultanés.

1 - PROCESSUS 1 : ALTERATION DE LA ROCHE-MERE

Sur une roche-mère dénudée par l'érosion, les facteurs climatiques - soleil, pluie, froid et vent - agissent. La roche-mère qui peut être dure (granite, schiste, grès, ...), tendre (craie, marne, argiles, ...) ou meuble (sables,éboulis,loess...) est fissurée, réduite en éléments plus fins; elle est désagrégée. Ensuite, les facteurs climatiques opèrent une altération chimique. Le résultat de ce processus est un mélange d'éléments : des minéraux plus ou moins désagrégés et non encore altérés : blocs de pierre, graviers, sables et limon pulvérulent; une sorte de pâte ou "complexe d'altération" résultant de l'altération chimique des minéraux : pâte d'argile colorée par des oxydes de fer, sels plus ou moins solubles de Ca, Mg, K, Na, etc ...

2 - PROCESSUS 2 : POURSUITE DE L'ALTERATION PAR LES MATIERES ORGANIQUES

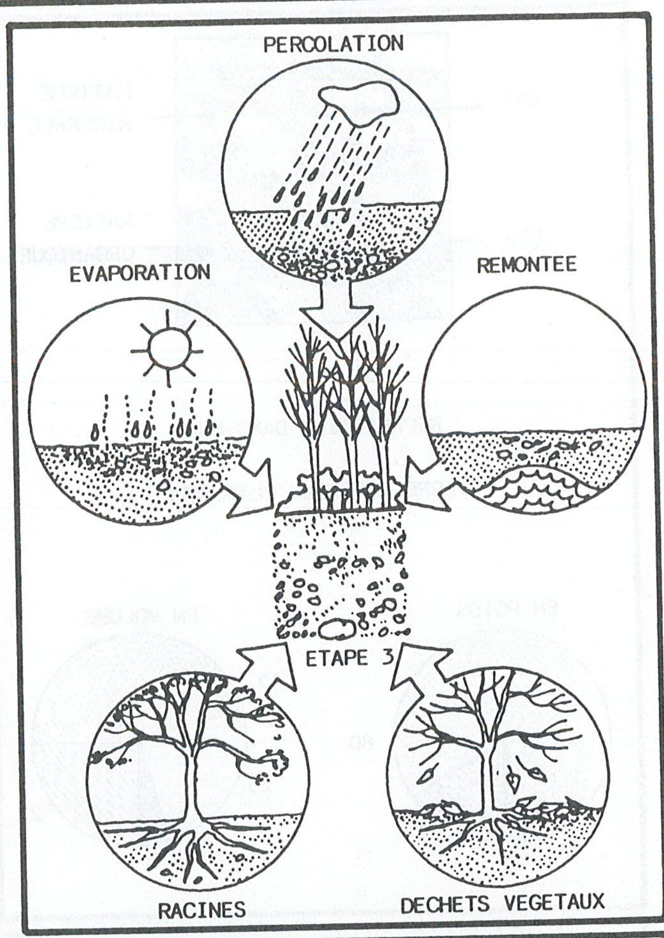
Le sol désagrégé et altéré, constitué de minéraux et d'éléments plus ou moins pâteux est alors colonisé par une flore et une faune qui l'enrichissent en substances chimiques et organiques, dont l'humus. L'humus a des propriétés différentes selon la nature du climat, de la roche-mère et de la végétation; il continue, avec les agents climatiques, à altérer les minéraux du sol. Le nouveau sol, non évolué, a un profil homogène et précise ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques.

3 - PROCESSUS 3 : MIGRATIONS VERTICALES DES ELEMENTS SOLUBLES

Sous climat pluvieux, les éléments solubles migrent vers le bas : c'est le lessivage. Sous climats secs à forte évaporation, les éléments solubles migrent vers la surface et l'enrichissent. Cette migration des éléments, accélérée ou freinée par le climat, par la perméabilité du sol et par le type d'humus formé, va créer dans le sol des couches plus ou moins distinctes et définir les horizons, qui constituent le profil pédologique d'un sol. (La pédologie est la science qui étudie les caractères physiques, chimiques et biologiques des sols)

On rencontre 2 grands types de sols : les sols jeunes ou "peu évolués", peu profonds et peu différenciés de la roche-mère, souvent constitués d'un seul horizon et les sols "évolués", profonds, caractérisés par une succession d'horizons lessivés et enrichis.

Mais la génèse d'un sol reste principalement tributaire de la nature de la roche-mère, du climat, de la végétation et de la topographie.

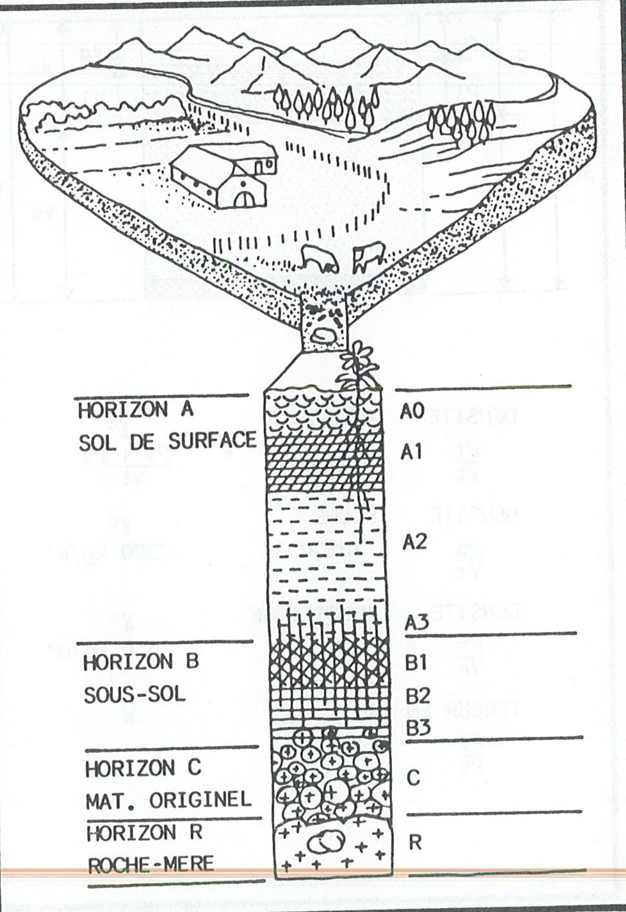


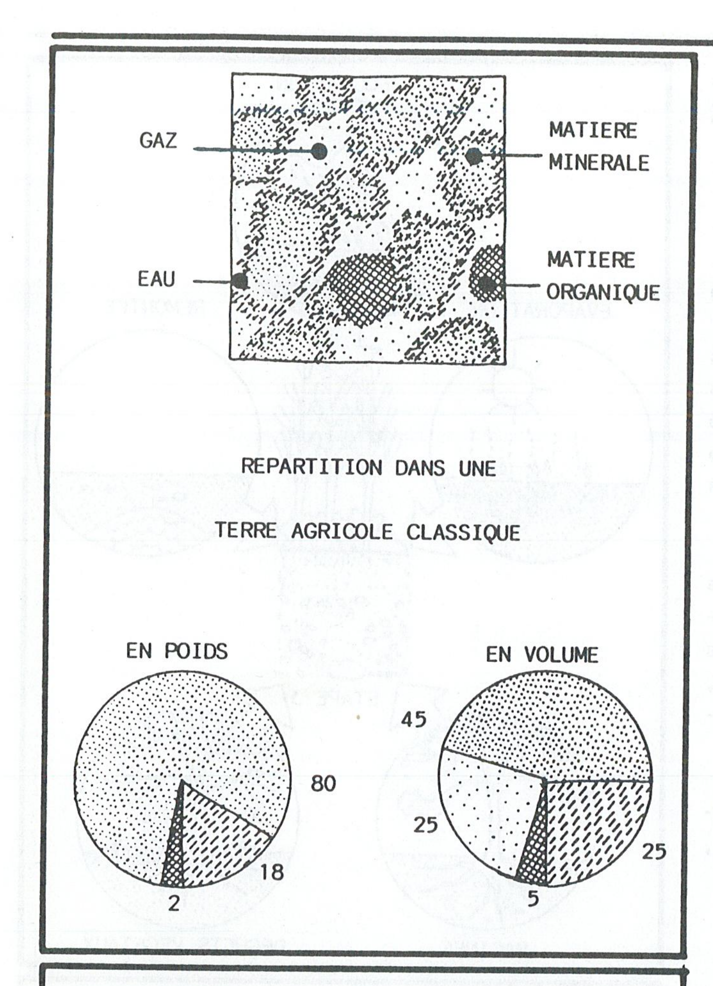
HORIZONS PRINCIPAUX

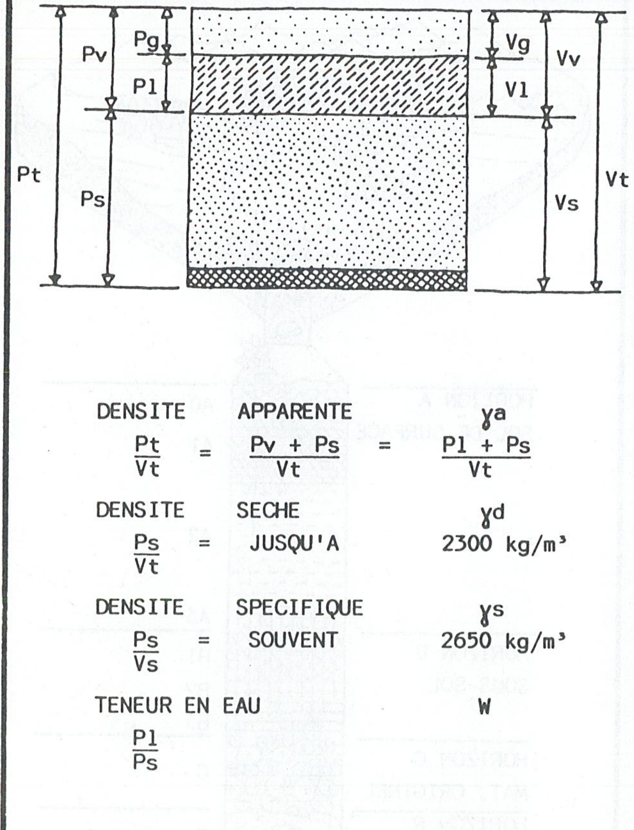
Une coupe pratiquée dans le terrain permet d'observer les différentes couches du sol.

- A0 Couche organique peu décomposée recouvrant le sol minéral (plus de 30 % de matières organiques).
- A1 Horizon mixte, mélange de matières organiques (- 30 %) et minérales.
- A2 Horizon dit "éluvial", pauvre en matières organiques, souvent lessivé en argiles et oxydes de fer, décoloré.
- A3 Transition entre les zones éluviales et illuviales, début d'accumulation des colloïdes.
- B1 Couche ferreuse contenant de la matière organique et des oxydes Fe et Al (sesquioxydes).
- B2 Horizon dit "illuvial", enrichi en argiles accumulées et en oxydes de fer.
- B3 Couche de transition entre B et C.
- C Matériau originel.
- R Roche-mère non altérée.

De nombreuses sous-classifications expriment des situations particulières. L'observation des horizons permettra une classification pédologique des terres en tenant compte de l'intégralité du profil du sol.







Le matériau terre est constitué de plusieurs éléments :

-Les constituants gazeux:principalement de l'air;

-Les constituants liquides : principalement de l'eau;

-Les constituants solides : la matière minérale et organique.

1 - CONSTITUANTS GAZEUX

C'est l'atmosphère de la terre :ils sont localisés dans les cavités et proviennent de l'air extérieur, de la vie des organismes et de la décomposition des matières organiques. Les constituants de l'air sont l'azote, l'oxygène, le gaz carbonique. On trouve aussi des gaz issus de la décomposition organique et de la respiration des êtres vivants : le gaz carbonique, l'hydrogène, le méthane ...

2 - CONSTITUANTS LIQUIDES

C'est la solution de la terre : ils sont solubles dans l'eau et proviennent à la fois de la pluie et des conditions atmosphériques (brouillard,humidité relative), des apports de l'homme et de la décomposition de la roche et des matières organiques. Les constituants liquides sont : l'eau, les éléments solubles dissous dans cette eau tels que corps organiques (sucres, alcools, acides organiques), et corps minéraux (acides, bases et sels en partie dissociés en ions Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+}, Na^{+}, PO_4^{---}, SO_4^{--}, CO_3^{--}, NO_3^{--}, etc ...).

3 - CONSTITUANTS SOLIDES

Ils sont insolubles dans l'eau.

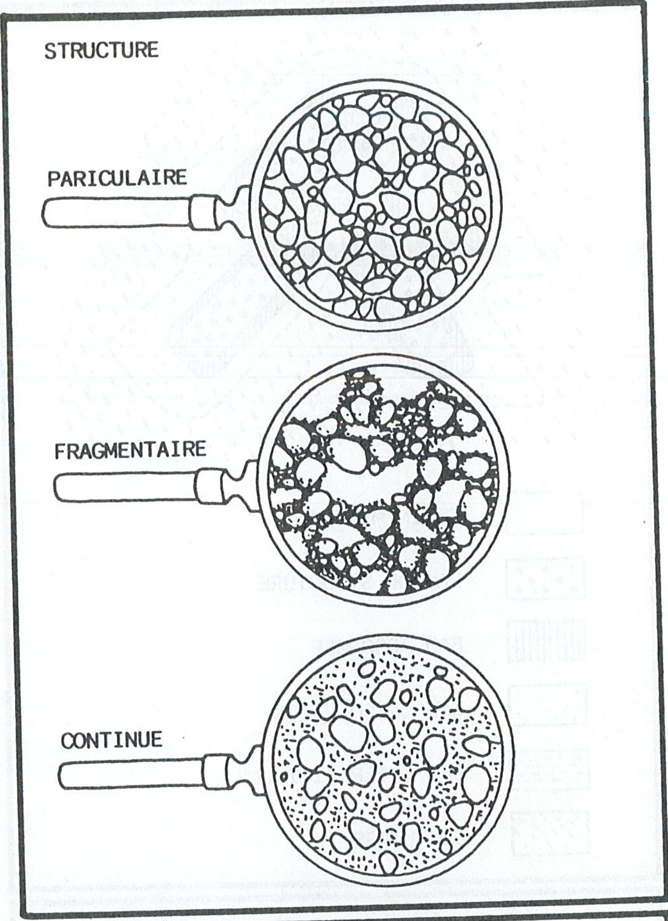
- LES CONSTITUANTS ORGANIQUES ou matières organiques, provenant des organismes végétaux ou animaux du sol ou apportés au sol. On distingue 4 groupes:
  . Les végétaux et animaux vivants : bactéries, champignons, algues, végétaux supérieurs, protozoaires, vers, insectes ...
  . Les déjections animales, les végétaux et animaux morts mais non encore décomposés.
  . Les matières organiques en décomposition, attaquées par les microbes du sol ou "produits transitoires".
  . L'humus, fraction colloïdale et stable des matières organiques dont la décomposition est très lente.
- LES CONSTITUANTS MINERAUX ou constituants mécaniques, provenant de la désagrégation de la roche-mère ou apportés par l'homme. Issus de la désagrégation des roches, "les éléments sableux" sont soit des fragments de roche (pierres et graviers), soit des minéraux qui constituent ces roches (sables et limons). Ils sont de même composition que ces minéraux et peuvent être silicieux, silicatés ou calcaires.

Les proportions respectives et la répartition de ces constituants caractérisent la structure et la texture de la terre qui précisent les propriétés.

LA STRUCTURE

Les constituants de la terre sont plus ou moins disposés, entamés ou liaisonnés. Le mode d'assemblage des constituants solides, à un moment donné, définit la structure d'une terre dont vont dépendre la circulation de l'eau et de l'air et les autres propriétés physiques. On distingue 3 principaux types de structures :

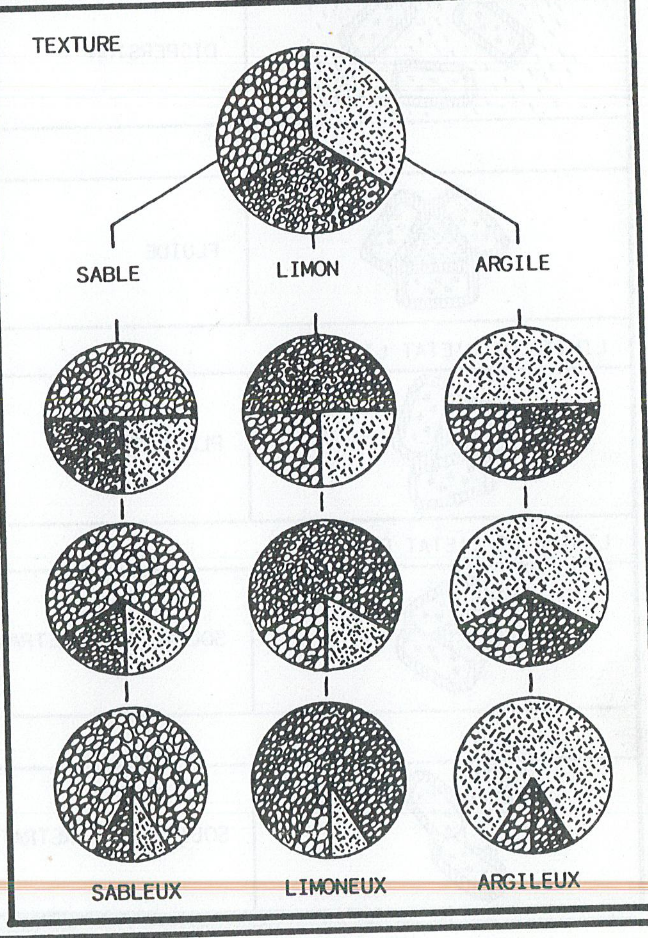
- 1 - STRUCTURE PARTICULAIRE : de type graveleux; très faible liaison par l'argile entre les éléments inertes.
- 2 - STRUCTURE FRAGMENTAIRE : de type grumeleux; liaison par l'argile en paquets graveleux qui sont liés entre eux.
- 3 - STRUCTURE CONTINUE : de type poudingue; les éléments inertes sont pris dans une masse d'argile (et limon).

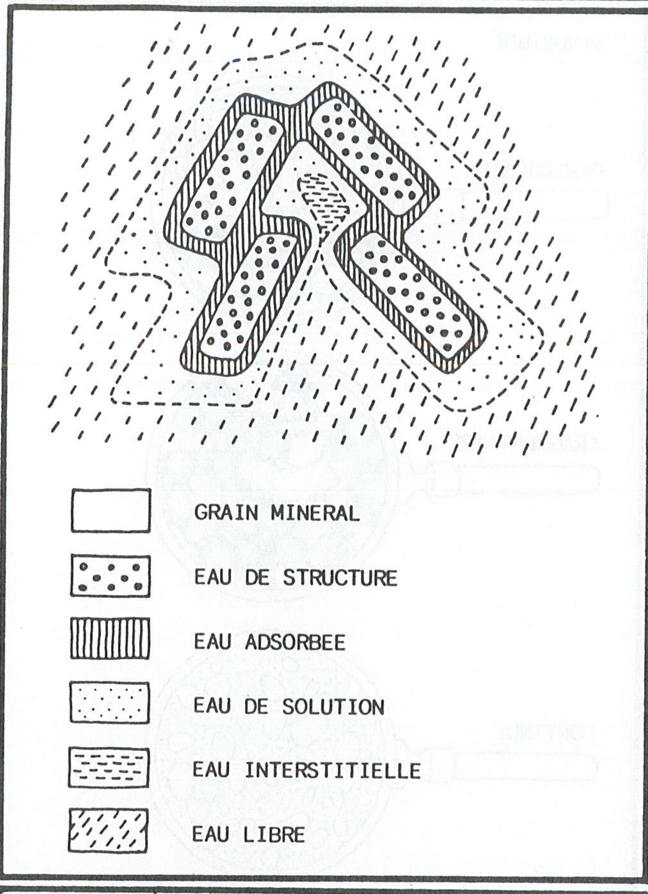


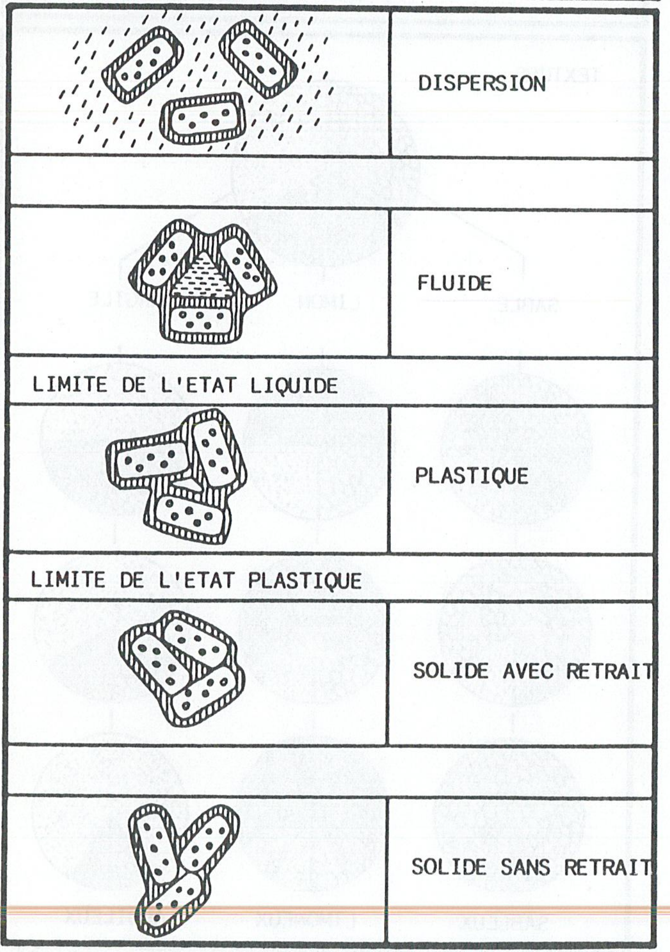
LA TEXTURE

C'est la composition granulaire d'une terre. La texture influe sur les propriétés car chaque fraction de grains a des caractéristiques propres qui peuvent définir celles de la terre si celle-ci en contient en quantité suffisante. 10 % d'argile p.e., suffisent à donner une propriété de cohésion et de plasticité à la terre. 40 à 50 % de fines argileuses donnent une terre qui a les propriétés d'une argile. On distingue 5 grands types de textures :

- 1 - TERRE ORGANIQUE : la tourbe, p.e
- 2 - TERRE GRAVELEUSE : prédominance de graviers et cailloux; apparence d'un béton.
- 3 - TERRE SABLEUSE : prédominance de sables; apparence d'un mortier.
- 4 - TERRE LIMONEUSE : prédominance de limon; terre fine peu cohésive et d'aspect soyeux.
- 5 - TERRE ARGILEUSE : prédominance d'argile; terre très cohésive,collante et modelable à l'état humide.







La propriété d'une terre varie selon la quantité d'air et d'eau contenue par sa structure.

AIR

L'air ne participe pas à la résistance de la terre et doit être si possible réduit. L'air emprisonne dans la terre divers micro-organismes tels que bactéries et fungi qui peuvent détruire les composants organiques des matériaux de construction. Les poches d'air forment des canaux libres au passage de l'eau sous forme de vapeur : la teneur en eau peut varier d'une partie à une autre du matériau. L'humidité relative de la vapeur d'eau contenue dans la terre varie selon le type de celle-ci et avec les variations de teneur en eau et de température. Les terres des zones tropicales et arides éprouvent des variations de teneur en eau et des écarts de température qui amplifient les mouvements de vapeur d'eau.

EAU

Différentes sortes d'eau pénètrent le sol et y sont retenues. Elles jouent un rôle important dans la détermination des propriétés.

- 1 - L'EAU LIBRE : elle se meut par gravitation ou par capillarité, au gré des mouvements de la nappe phréatique ou des variations journalières de la pression atmosphérique et de la température. L'eau capillaire accumulée dans de petits pores à la surface des particules n'est pas absorbée; elle peut être éliminée à des températures ambiantes normales.

- 2 - L'EAU INTERSTICIELLE : elle est retenue par des pores très petits où la capillarité est supérieure aux forces hydrodynamiques. Cette eau peut être éliminée à des températures normales mais après un long séchage ou à l'étuve entre 50 et 120° C.

- 3 - L'EAU DE SOLUTION : sous forme de film autour des particules solides et retenue à leur surface par les forces polaires, électrostatiques et d'hydratation ionique. Elle peut être éliminée à des températures ambiantes normales.

- 4 - L'EAU ADSORBEE : sous forme de film très fin, à la fois sur les surfaces externes et internes. Cette eau est retenue par des forces si puissantes qu'elle ne peut se mouvoir. Elle peut être éliminée à des températures supérieures à 100° C et jusqu'à 200° C.

- 5 - L'EAU DE STRUCTURE : ce n'est pas vraiment de l'eau car elle représente les groupes hydroxyles qui font parties des réseaux cristallins solides. Elle peut être éliminée à partir de températures voisinant 600° C.

EFFETS DE L'EAU

Les variations en eau libre, interstitielle ou de solution peuvent changer les propriétés physiques d'une terre. Dans un gros sable, c'est l'eau interstitielle qui prédomine alors que c'est l'eau de solution dans un sol argileux fin. Les caractéristiques structurales et hydrauliques de ce dernier type de terre sont affectées par l'épaisseur de la couche d'eau de solution qui à son tour est sensible aux éléments dissous dans l'eau.

1 - EFFETS DUS AU CARACTERE LIQUIDE

- COHESION : les particules fines (limons et argiles) doivent leur cohésion entre autres aux films d'eau qui les relient. Ces forces cohésives sont de 2 types : celles dues à la tension de surface à l'interface air/eau (grains grossiers) et celles dues à l'interaction des particules d'argile et des molécules d'eau polarisées.
- SUCCION: les forces à l'origine de l'hydratation de surface des particules se combinent à la tension de surface créant une succion dans l'eau qui croît avec la réduction de la teneur en eau.
- GONFLEMENT: à la surface des argiles, les forces d'adsorption agissant sur les molécules d'eau sont fortes. Les couches adsorbées gonflent avec l'humidification de l'argile. La terre augmente de volume.
- RETRAIT: le retrait des argiles est généralement dû à l'évaporation de l'eau.
- PLASTICITE : au-delà de sa limite d'élasticité, une terre cohésive bien hydratée peut se déformer sans se briser. La plasticité due à l'effet lubrifiant des films d'eau entre les particules dépend de la taille, de la forme des particules et de la nature chimique de leurs surfaces.

2 - EFFETS DUS AU CARACTERE SOLVANT

- LES SELS SOLUBLES en solution sont dissociés en cations métalliques de Na^+, Mg^+, Ca^+ et Al^+ qui sont adsorbés sur les surfaces des particules. Les sulfates de Na, Mg et Ca affectent la terre en la brisant par cristallisation.
- LES MATIERES ORGANIQUES peuvent influencer la redistribution des éléments minéraux dans le sol; ceci est spécialement le cas pour le fer.

LES 12 ETATS HYDRIQUES DE LA TERRE

- CONGLOMERAT COMPACT : agglomération monolithique de matériaux grossiers; terre compacte et lourde difficile à découper.
- CONGLOMERAT FRIABLE : agglomération de matériaux friables ou décomposés facile à découper incluant la tourbe et les mottes de gazon.
- CONCRETION SOLIDE : terre complètement sèche, en gros morceaux ou en mottes solides.
- CONCRETION FRIABLE : terre complètement sèche sous forme pulvérisée.
- TERRE PEU HUMIDE : terre dont l'humidité naturelle est peu élevée (4-10 %)*; sensation tactile sèche plutôt qu'humide.
- TERRE HUMIDE : terre dont le toucher donne une sensation d'humidité réelle (8-18 %)*; ne peut être façonnée par manque de plasticité.
- PATE FERME : une forte pression des doigts est nécessaire pour former une boule de terre (15-25 % de teneur en eau)* qui ne se déforme presque pas quand elle tombe d'une hauteur de 1 mètre.
- PATE MI-FERME : une légère pression des doigts sufit pour former une boule de terre (15-30 % d'humidité)*; tombant de 1 mètre, la boule s'affaisse légèrement sans se désagréger.
- PATE MI-MOLLE : il est très facile de former une boule avec cette terre homogène, non collante ni salissante (15-30 % d'humidité)*; tombant de 1 mètre, la boule s'affaisse notoirement sans se désagréger.
- PATE MOLLE : il est très difficile ou impossible de former une boule avec cette terre très collante et salissante (20-35 % d'humidité)*.
- BOUE : terre détrempée d'eau, masse visqueuse plus ou moins liquide.
- BARBOTINE : terre argileuse totalement dispersée dans l'eau : liant très liquide, coulant.

- La limite de l'état plastique ou LIMITE DE PLASTICITE LP se situe très approximativement entre l'état de pâte ferme et de pâte mi-ferme.

- La limite de l'état liquide ou LIMITE DE LIQUIDITE LL se situe très approximativement entre l'état de pâte molle et de boue.

* valeurs de teneur en eau indicatives, variables selon la nature de la terre.

La fraction solide de la terre est composée de matières minérales, résultant de la désagrégation physique et de l'altération chimique de la roche-mère sousjacente, et de matières organiques, qui sont essentiellement des résidus plus ou moins décomposés d'organismes végétaux et animaux.

MATIERES ORGANIQUES

Pour des conditions normales, les matières organiques sont concentrées dans l'horizon de surface des sols, sur une épaisseur de l'ordre de 5 à 35 cm. Parfois, les matières organiques peuvent contenir des composants végétaux visibles. D'autres fois, la décomposition de la structure végétale originelle est si avancée que l'on se trouve en présence d'un matériau de couleur noire : l'humus. Les matières organiques récemment décomposées ont des caractéristiques différentes de l'humus: elles consistent en macroparticules ou fibres relativement inertes du point de vue physique ou chimique. L'humus est de nature colloïdale et acide, doté d'une forte capacité d'échange basique (ions) et d'absorption de l'eau qui augmente son volume. Les matières organiques ont une structure ouverte et spongieuse et sont dotées d'une faible résistance mécanique. La teneur en eau peut être très élevée (de 100 à 500 %) supprimant toute stabilité mécanique. La nature acide des composants organiques tend à provoquer des réactions acides avec l'eau du sol qui peuvent avoir des effets corrosifs sur les matériaux en contact. La concentration et le type de matières organiques affectent fortement les caractéristiques d'une terre naturelle audessus de teneurs de l'ordre de 2 à 4 %.

MATIERES MINERALES

Les composants minéraux d'un sol, ou inorganiques, constituent généralement la plus grande partie d'un sol.
On distingue deux groupes de minéraux :

- **LES MINERAUX INALTERES** ou incomplètement altérés: ils sont de composition identique à la roche-mère dont ils sont issus; ce sont les cailloux et graviers, les sables et les limons. Ce sont les éléments sableux.

- **LES MINERAUX ALTERES** : ils résultent d'une altération chimique des minéraux de la roche-mère et sont marqués par une réduction extrême de leur taille (moins de 2 μ). De par leur finesse, ces particules minérales altérées ont la forme d'une pâte collante si elles sont humidifiées. On leur a donné le nom de colloïde, "sorte de colle", car elles forment le liant de la terre. Les principaux colloïdes sont les argiles et c'est pour cette raison que l'on parle plus souvent en géotechnique de la fraction argileuse plutôt que de la fraction colloïdale.

ELEMENTS SABLEUX

Ils peuvent être silicieux,silicatés ou calcaires

- **LES ELEMENTS SILICEUX** : ils résistent à l'altération chimique. Ce sont des grains de quartz issus de la désagrégation des grès et des roches cristallines. On les rencontre aussi bien dans les fractions grossières que fines.

- **LES ELEMENTS SILICATES**: leur altération chimique est continue mais très lente. Ils sont formés de grains de mica, de feldspath et d'autres minéraux libérés par la désagrégation des roches cristallines : granite, roches volcaniques. L'altération de ces éléments est d'autant plus efficace qu'ils sont fins.

- **LES ELEMENTS CALCAIRES** : c'est la fraction des éléments sableux constitués de carbonate de calcium. Il faut bien distinguer les terres formées sur roche-mère calcaire des terres formées sur roche-mère non calcaire. Le calcaire n'est pas toujours présent dans le sol mais tous les sols contiennent du calcium fixé sur les argiles en ions calciques ou en solution du sol sous forme de sels solubles de calcium.

Pour faciliter leur identification, les composants minéraux ont été divisés en fractions granulaires qui sont situées entre des limites dont la définition est arbitraire.

1 - CAILLOUX

Leur taille se situe entre 200 mm et 20 mm. Il s'agit d'un matériau grossier résultant de la désagrégation de la roche-mère dont ils héritent des caractéristiques fondamentales. Ils peuvent être également un matériau d'apport. Les cailloux jeunes ont des formes angulaires. Les cailloux fortement désagrégés ont des formes arrondies ainsi que ceux qui ont été transportés par les cours d'eau ou les glaciers.

2 - GRAVIERS

Leur taille se situe entre 20 mm et 2 mm. Ce sont des particules de matériau grossier, de petite taille, résultant de la désagrégation de la roche-mère et des cailloux. Ils peuvent également avoir été apportés par les cours d'eau et présentent alors des formes rondes. Mais ils peuvent aussi être anguleux. Les graviers constituent le squelette de la terre et limitent sa capillarité et son retrait.

3 - SABLES

Leur taille se situe entre 2 mm et 0,06 mm. Ils sont souvent composés de particules de silice ou de quartz. Certains sables de plage contiennent du carbonate de calcium(fragments de coquillages). Les sables glaciaires contiennent des minéraux rocheux pulvérisés. La fraction sableuse d'un sol est caractérisée par sa grande friction interne. Les particules sableuses manquent de cohésion du fait de la faible influence des films d'eau au voisinage de leur surface dont l'adsorption très réduite limite le gonflement et le retrait. Les sables sont caractérisés par leur structure ouverte et leur perméabilité.

4 - LIMON

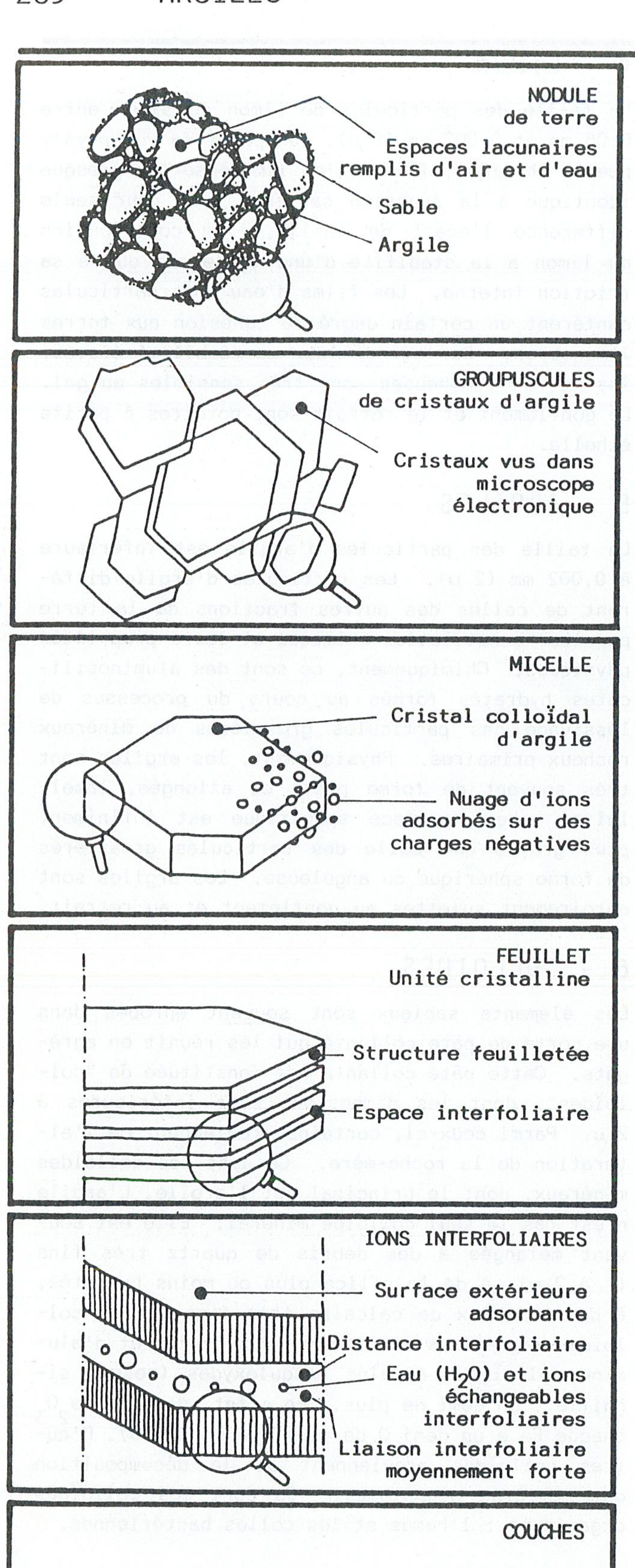
La taille des particules de limon se situe entre 0,06 mm et 0,002 mm (2 μ). Du point de vue physique et chimique, la fraction limoneuse est presque identique à la fraction sableuse avec pour seule différence l'écart de taille. La contribution du limon à la stabilité d'une terre est due à sa friction interne. Les films d'eau interparticules confèrent un certain degré de cohésion aux terres limoneuses. Du fait de leur perméabilité élevée, les terres limoneuses sont très sensibles au gel. Le gonflement et le retrait sont notoires à petite échelle.

5 - ARGILES

La taille des particules d'argile est inférieure à 0,002 mm (2 μ). Les particules d'argile diffèrent de celles des autres fractions de la terre par leur constitution chimique et leurs propriétés physiques. Chimiquement, ce sont des aluminosilicates hydratés formés au cours du processus de lessivage des particules grossières de minéraux rocheux primaires. Physiquement, les argiles sont très souvent de forme plate et allongée, lamellaire. Leur surface spécifique est infiniment plus grande que celle des particules grossières de forme sphérique ou anguleuse. Les argiles sont notoirement sujettes au gonflement et au retrait.

6 - COLLOIDES

Les éléments sableux sont souvent enrobés dans une sorte de pâte collante qui les réunit en agrégats. Cette pâte collante est constituée de "colloïdes", dont les dimensions sont inférieures à 2 μ. Parmi ceux-ci, certains proviennent de l'altération de la roche-mère. Ce sont les colloïdes minéraux, dont le principal est l'argile. L'argile n'est pas le seul colloïde minéral. Elle est souvent mélangée à des débris de quartz très fins (1 à 2 μ), à de la silice plus ou moins hydratée, à des cristaux de calcaire très fins et des colloïdes magnésiens et à des oxydes de fer et d'alumine colloïdaux appelés sesquioxydes (sesqui signifie : un demi de plus. En effet, dans le Fe_2O_3 chaque Fe a un demi O de plus que dans FeO). D'autres colloïdes proviennent de la décomposition des matières organiques. Ce sont les colloïdes organiques : l'humus et les colles bactériennes.

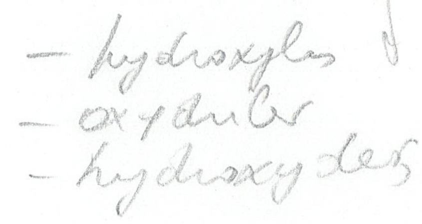


ORIGINE

C'est l'altération chimique des roches et plus exactement des minéraux silicatés (feldspath, micas, amphibole, pyroxène ...) qui est à l'origine des argiles.

STRUCTURE

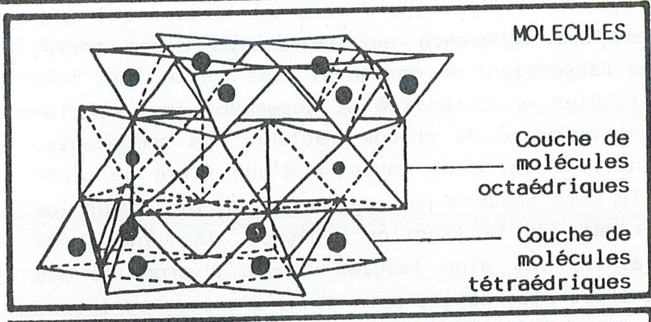
Les grosses molécules d'argile (ou micelles) sont de fins cristaux de forme irrégulière ou hexagonale. Cette dernière forme est la plus banale mais il en existe d'autres : des plaquettes hexagonales ou pseudo-hexagonales, des fibres cylindriques ou tubulaires creuses, des tablettes épaisses ou des disques. Les micelles d'argiles sont constituées de feuillets, d'où le nom de phyllite donné aux minéraux argileux; comme les micas, ils font partie du groupe des phyllosilicates. Chaque micelle est composée de plusieurs dizaines ou centaines de feuillets dont la structure détermine celle des minéraux ainsi que les propriétés proches de celles du cristal, entre autres les propriétés adsorbantes analogues à celles des colloïdes. Ces feuillets ont une constitution chimique qui varie selon le type d'argile et l'état d'hydratation ainsi que leur épaisseur et leur écartement : de 7 à 20 Angström (1 Å = 1 millionnième de mm). Leur dimension s'étage de 0,01 à 1 micron. Certains feuillets sont constitués de silice (atomes de silicium entourés d'atomes d'oxygène), d'autres d'alumine (atomes d'aluminium entourés d'atomes d'oxygène et de groupements OH). Mais il existe d'autres argiles dont la base n'est pas Si et Al mais Si et Mg ou Si et Fe. Toutefois les silico-alumineux représentent 74 % de l'écorce terrestre (1) et l'on s'en tiendra à ceux-ci. C'est l'arrangement des oxygènes et des hydroxyles qui détermine la structure des minéraux argileux, à l'instar de la plupart des silicates. Ceux-ci peuvent être situés dans des cavités tétraédriques ou octaédriques.



La physique et la chimie des argiles sont très complexes car les minéraux argileux sont notamment sujets à d'innombrables phénomènes électriques.

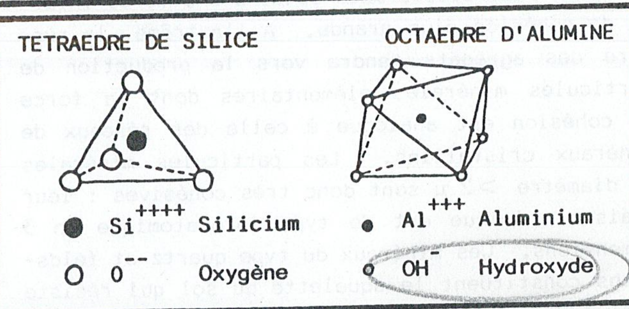
PRINCIPALES ESPECES

Il existe plusieurs familles de minéraux argileux qui rassemblent des dizaines d'espèces. Mais ce sont 3 grands types d'argiles dont la présence dans les sols est la plus fréquente: la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.



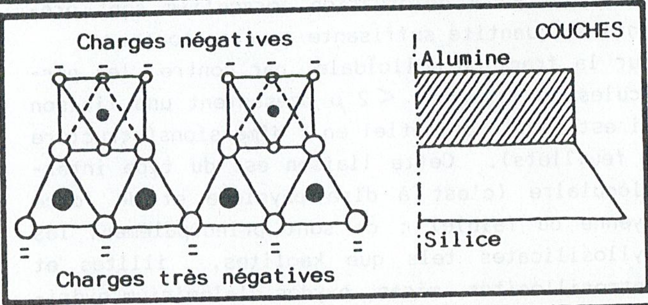
1 - KAOLINITE

Les feuillets ont une structure composée d'une couche de tétraèdres d'oxygène à coeur de silicium et d'une couche d'octaèdres d'oxygène (ou hydroxyde) à coeur d'aluminium. La kaolinite ne présente de charges négatives qu'en bordure des feuillets et sa capacité de fixation d'ions est faible. La distance interfoliaire est fixe, elle est de 7 Å. L'épaisseur des cristaux est de 0,005 à 2 μ. La surface externe SE est de 10 à 30 m² par gramme; la surface interne SI = 0. La kaolinite est plutôt stable au contact de l'eau.



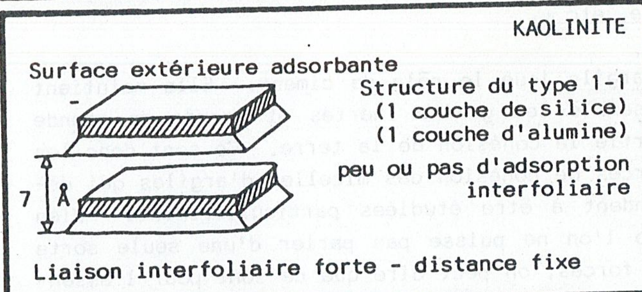
2 - ILLITE

C'est une structure à 3 couches : 1 couche octaédrique, principalement alumineuse entre 2 couches tétraédriques principalement siliceuses. Des ions Mg ou Fe peuvent remplacer en partie Al dans la couche alumineuse, des ions Al se substituent à Si dans la couche siliceuse; ainsi le feuillet est non saturé, les charges négatives sont équilibrées par des ions K qui unissent les feuillets. La distance interfoliaire est de 10 Å., l'épaisseur des cristaux de 0,005 à 0,05 μ. SE est de 80 m²/g et SI de 800 m²/g. L'illite n'est pas très stable au contact de l'eau : gonflement.



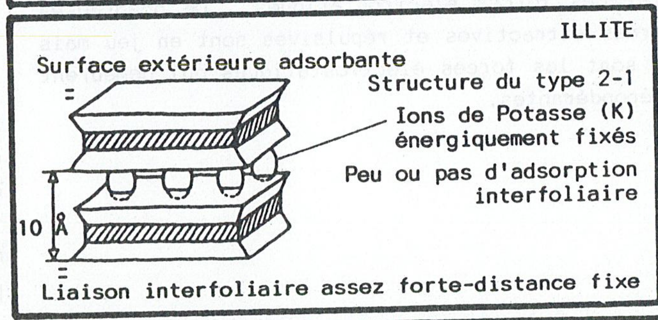
3 - MONTMORILLONITE

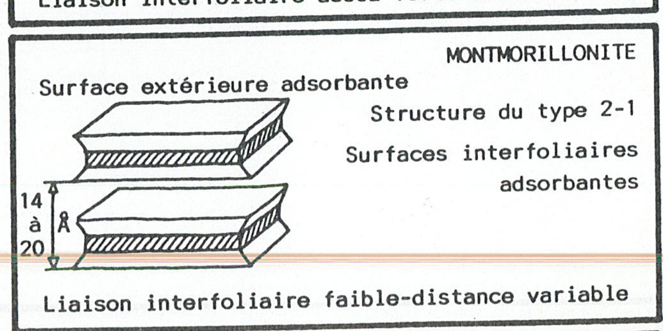
La structure est similaire à celle de l'illite, mais on observe des substitutions dans la couche octaédrique d'alumine : les ions Al peuvent être permutés par Mg, Fe, Mn, Ni ... Les feuillets ne sont pas électriquement neutres et faiblement liés et les ions interfoliaires ne sont pas des ions K. Ce sont des cations échangeables (Na, Ca) et des molécules d'eau. Les feuillets peuvent s'écarter de 14 à 20 Å. L'épaisseur des cristaux est de 0,001 à 0,02 μ; SE est de 80 m²/g et SI de 800 m²/g. Les montmorillonites ne sont pas stables au contact de l'eau : très gonflantes.



4 - AUTRES

Il existe un grand nombre d'autres argiles, comme CHLORITE, MUSCOVITE, HALLOYSITE, VERMICULITE, SEPIOLITE, ATTAPULGITE, etc ... et les INTERSTRATIFIES, qui sont des combinaisons complexes de plusieurs argiles.





Il existe différentes forces de liaison qui donnent une cohérence aux particules d'une terre, les rassemblent en agrégats. Ces forces sont très variables en intensité et dépendent du comportement autonome de chaque fraction des composants. Ainsi, la force de cohésion d'une terre ne peut-elle être résumée par une seule valeur. Pour les agrégats de la fraction sableuse, la rupture des liaisons les plus faibles tendra à produire des agrégats plus petits mais dotés d'une force interne de cohésion plus grande. A l'extrême, la rupture des agrégats tendra vers la production de particules minérales élémentaires dont la force de cohésion est analogue à celle des réseaux de minéraux cristallins. Les particules minérales de diamètre $>2\ \mu$ sont donc très cohésives : leur liaison chimique est de type interatomique en 3 dimensions. Ces minéraux du type quartz et feldspaths constituent le squelette du sol qui résiste très bien à la déformation lorsqu'ils sont présents en quantité suffisante pour se toucher.
Pour la fraction colloïdale, par contre, les particules de diamètre $<2\ \mu$ présentent une liaison qui est pour l'essentiel en 2 dimensions(structure en feuillets). Cette liaison est du type intermoléculaire (c'est à dire physique et de force moyenne ou faible) : ce sont principalement les phyllosilicates tels que kaolites, illites et montmorillonites, micas, oxydes d'aluminium hydrique, etc ...

L'argile joue le rôle de ciment. Elle maintient ensemble les grains inertes et assure en grande partie la cohésion de la terre. Ce sont donc les forces de cohésion des micelles d'argiles qui demandent à être étudiées particulièrement. Bien que l'on ne puisse pas parler d'une seule sorte de forces, on peut dire que ce sont pour l'essentiel des forces électrostatiques. De nombreuses forces attractives et répulsives sont en jeu mais ce sont les forces électrostatiques qui demeurent prépondérantes.

1 - FORCES ELECTROSTATIQUES

Les micelles d'argile ne sont pas électriquement neutres; elles peuvent être chargées négativement ou positivement.
- LES CHARGES NEGATIVES : elles ont une double origine :
  - Les valences non satisfaites, soit à l'extrémité des feuillets brisés (atome d'oxygène) soit sur les surfaces extérieures plates par la dissociation d'un ion H d'un groupement OH (feuillet de kaolinite).
  - Les substitutions : les atomes Si et Al peuvent être remplacés par des atomes de valence plus faible : p.e., dans un feuillet de silice, des atomes Si^{++++} sont remplacés par des atomes Al^{+++} de valence plus faible; il apparaît une charge négative non compensée d'un atome d'oxygène. De même, dans un feuillet d'alumine, un atome Al^{+++} peut être remplacé par un atome Mg^{++}.
- LES CHARGES POSITIVES : moins nombreuses que les charges négatives, elles peuvent apparaître soit aux points de rupture des feuillets, si la rupture met à nu un atome de silice ou d'alumine dont l'une des charges positives n'est plus équilibrée par un atome d'oxygène ou un groupement OH,soit par suite de l'association fréquente entre l'argile et les hydroxydes de Fe ou de Al libérant par dissociation des ions OH^-.

- MECANISMES

Il peut s'établir entre les micelles d'argile des liens surface-côté, du fait de forces attractives. Mais ce peut être également un lien surface-surface à charge négative ou un lien côté-côté. La théorie de la floculation (inverse de la dispersion) explique ces phénomènes : l'eau du sol est un agent de liaison. Elle est chargée d'ions positifs, ou cations (Na^+, Ca^{++}, Al^{+++}) assez nombreux pour équilibrer les charges négatives des particules : le système est électriquement neutre. Selon leur hydratation, les cations donnent naissance à des chaînes de molécules d'eau orientées. Quand un cation hydraté est proche d'une particule, les deux ensembles de chaînes de molécules d'eau relient l'ion et la surface de la particule. De même, un ion peut agir comme un pont entre deux particules d'argile adjacentes.

2 - AUTRES FORCES

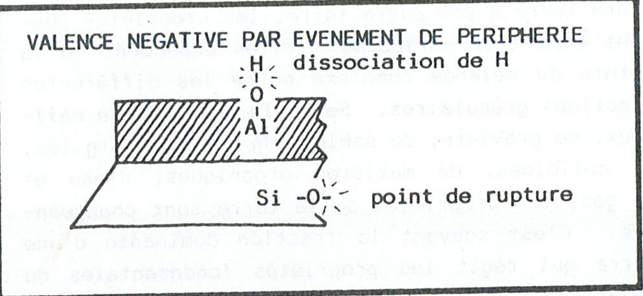
Les liaisons entre micelles d'argile,entre argiles et grains inertes, et entre grains inertes impliquent également d'autres forces. On relève l'importance de la cimentation, de la capillarité et des forces électromagnétiques.

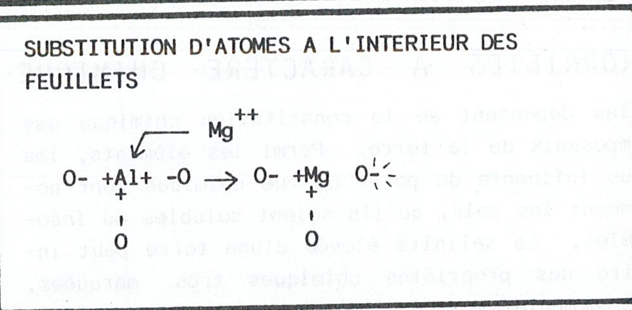
- 1 - **LA CIMENTATION** : elle résulte des cycles de précipitation et de dissolution et se traduit par la création de "ponts" liant entre elles des particules similaires ou de nature différente. Les principaux agents de cimentation sont la calcite, la silice, l'oxyde ferrique, les colles bactériennes, etc ...

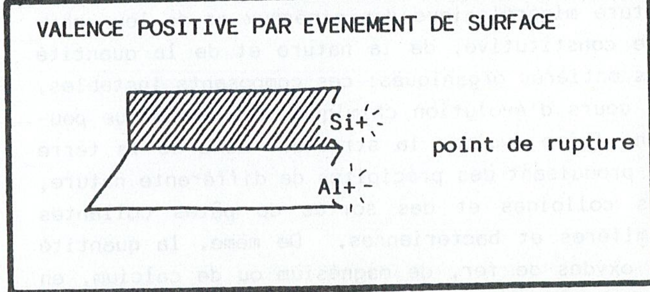
- 2 - **LA CAPILLARITE** : bien qu'analogue à la cimentation, la liaison capillaire n'est pas aussi rigide et demeure réversible. Quand un fluide imprègne une particule, il pénètre plus favorablement par les canaux capillaires. Une forte traction peut être nécessaire pour séparer les particules liées par capillarité. Outre les forces d'attraction résultant des tensions interfaces, l'eau peut agir comme agent de transmission de forces entre les particules ou comme agent diélectrique. Les puissantes forces de retrait dues à l'action capillaire peuvent renforcer l'action de forces moins puissantes et réduire la distance interparticulaire. Les forces capillaires cohésives intéressent surtout les grains inertes et non les micelles d'argile.

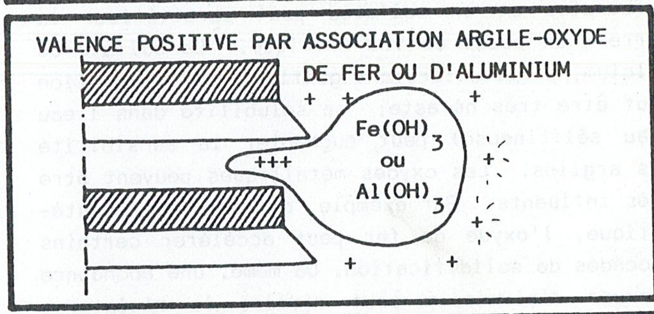
- 3 - **FORCES ELECTROMAGNETIQUES** : ce sont les forces Van der Waals. Peu importantes, elles jouent néanmoins un rôle non négligeable dans le mécanisme de liaison des micelles d'argile et des grains inertes; elles créent un film de micelles orientées, augmentant ainsi la friction. Les forces Van der Waals intéressent surtout les micelles de taille normale mais semblent aussi jouer un rôle dans la cohésion des micelles plus petites.

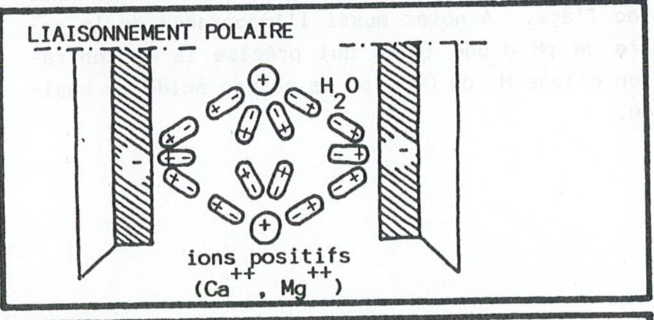
- 4 - **LA FRICTION** : Ce sont les rugosités de surface qui sont à l'origine de la friction. Cette rugosité varie de l'échelle atomique à l'échelle moléculaire selon des désorientations microscopiques et des striations macroscopiques. L'observation au microscope électronique montre que les surfaces argileuses peuvent être liées par friction.

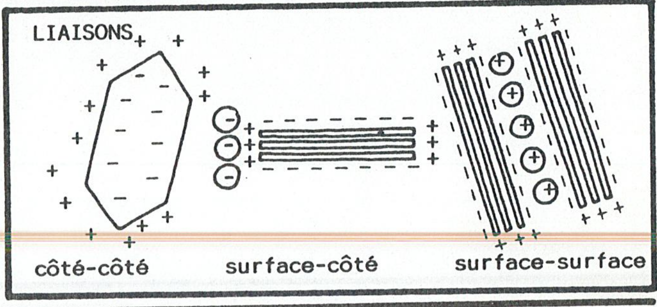












D'une terre à une autre terre, les propriétés peuvent être très variables. Elles dépendent de la nature du mélange complexe entre les différentes fractions granulaires. Selon la quantité de cailloux, de graviers, de sables, de limon, d'argiles, de colloïdes, de matières organiques, d'eau et de gaz, les propriétés de la terre sont changeantes. C'est souvent la fraction dominante d'une terre qui régit les propriétés fondamentales du matériau.

PROPRIETES A CARACTERE CHIMIQUE

Elles dépendent de la constitution chimique des composants de la terre. Parmi les éléments, les plus influents du point de vue chimique sont notamment les sels, qu'ils soient solubles ou insolubles. La salinité élevée d'une terre peut induire des propriétés chimiques très marquées. Ces propriétés sont également tributaires de la nature minéralogique des minéraux et de leur chimie constitutive, de la nature et de la quantité des matières organiques: ces composants instables, en cours d'évolution chimique et biochimique peuvent faire évoluer la structure même de la terre en produisant des précipités de différente nature, des colloïdes et des sortes de pâtes collantes humifères et bactériennes. De même, la quantité en oxydes de fer, de magnésium ou de calcium, en carbonates et en sulfates peut caractériser la terre d'un point de vue chimique. Le sulfate de calcium, particulièrement gonflant à l'hydratation peut être très néfaste; sa solubilité dans l'eau (eau sélitineuse) peut augmenter la sensibilité des argiles. Les oxydes métalliques peuvent être très influents. Par exemple, dans une terre latéritique, l'oxyde de fer peut accélérer certains procédés de solidification. De même, une abondance d'oxyde d'aluminium peut réduire la résistance avec l'âge. A noter aussi l'importance de la mesure de pH d'une terre qui précise la concentration d'ions H^+ ou OH^-, et sa nature acide ou basique.

PROPRIETES A CARACTERE PHYSIQUE

Elles sont nombreuses et permettent de préciser la qualité d'une terre pour la construction.

- COULEUR : le spectre de couleur des terres est très large et peut aller du blanc au noir en passant par le beige, l'ocre jaune ou rouge, l'orangé, le rouge, le brun, le gris et même le bleu et le vert.

- AMEUBLISSEMENT : c'est l'aptitude d'une terre à être facilement brisée. Les terres à fraction sableuse dominante se brisent facilement alors que les terres très argileuses s'ameublissent très difficilement.

- STABILITE STRUCTURALE : c'est la solidité de la structure de la terre qui précise sa résistance aux agents de dégradation.

- ADHESIVITE : ou adhérence; c'est l'aptitude d'une terre, pour un certain degré d'humidité d'adhérer aux objets, notamment les outils. Elle augmente avec l'humidité jusqu'à un maximum pour ensuite diminuer.

- MASSE VOLUMIQUE APPARENTE : elle concerne la terre dans son ensemble et s'exprime en kg/m³.

- MASSE VOLUMIQUE SPECIFIQUE : c'est la densité des constituants de la terre eux-mêmes. Elle s'exprime en kg/m³; p.e., les micas et les feldspaths ont une densité spécifique de 2600 à 2700 kg/m³, les sables de 2600 à 3000 kg/m³, les argiles, de 2500 kg/m³.

- TENEUR EN EAU : c'est la quantité d'eau contenue dans la terre, soit à l'état naturel, soit après manipulation et séchage. Elle s'exprime en % pondéral et définit les différents états hydriques de la terre.

- POROSITE : ou indice des vides; c'est le volume des vides de la terre exprimé en % du volume total. Il y a une relation entre la porosité et la densité spécifique; p.e., pour un limon de densité spécifique de 1600 à 1800 kg/m³, la porosité est inférieure à 40 %.

- **POUVOIR ADSORBANT** : c'est la propriété que possèdent l'argile, l'humus et le complexe argilo-humique de retenir à leur surface des ions électro positifs surtout, mais également électronégatifs, provenant de la solution de la terre. La fixation des ions s'explique par les charges négatives et positives entourant les feuillets d'argile et les micelles d'humus. Pour 100 g., le nombre de charges positives qui peuvent être adsorbées par la kaolinite est de 20 à 90 x 10^{20}, de 120 à 240 x 10^{20} pour l'illite et de 360 à 500 x 10^{20} pour les montmorillonites.

- **POTENTIEL CAPILLAIRE** : ou pF qui mesure la force de succion de l'eau par la terre et qui s'exprime en g/cm² ou en atmosphères. pF est le logarithme décimal de cette pression. Plus le sol est humide plus la succion est élevée et moins l'eau est retenue dans la terre. Plus la terre est sèche plus la succion augmente.

- **DIFFUSION CAPILLAIRE** : c'est le déplacement de l'eau retenue dans la terre.

- **PERMEABILITE** : c'est la vitesse de percolation qui dépend de la texture mais surtout de la structure . Elle s'exprime en cm/heure; p.e., un limon argileux peu perméable donne une mesure de 0,6cm/h et une terre sableuse très perméable de 50 à 60 cm/heure (terres non remaniées)

- **CHALEUR SPECIFIQUE** :c'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de la terre de 1°C. Elle s'exprime en kcal/kg°C; p.e. l'eau a une valeur de 1 kcal/kg°C, le sable de 0,191, l'argile de 0,23.

- **SURFACE SPECIFIQUE** : c'est une mesure qui s'applique surtout aux argiles et qui permet d'apprécier l'activité chimique d'échange d'ions. Elle s'exprime en cm²/gramme; p.e., les gros sables ont une surface spécifique de 23 cm²/g, les limons de 454 cm²/g et les argiles jusqu'à 800 m²/g.

- **CAPACITE TOTALE D'ECHANGE (T)** :c'est la quantité maximale de cations de toutes sortes qu'une terre est capable de retenir. Cette mesure représente le total des charges négatives de la terre disponibles pour la fixation de cations métalliques ou d'ions H^+. Elle s'exprime en milliéquivalents ou m.e.q. pour 100 g. de terre. L'équivalent d'un corps est le rapport masse atomique/valence de ce corps; le m.e.q. en est le millième. Exemple: une terre qui a une T de 30 m.e.q. pourrait retenir en Ca : 30 m.e.q. x 40/2 = 600 mg. de Ca/100g. de terre. La valeur de T d'une terre est stable car elle dépend du taux et de la nature des colloïdes qui ne peut beaucoup varier. T est élevé pour les sols argileux et humifères et faible pour les sols sableux.

- **TAUX DE SATURATION (V)** : c'est le rapport: somme des bases échangeables/capacité totale d'échange. On l'exprime en % : V = S/T x 100. Ce taux est très variable d'une terre à une autre. Il dépend de la richesse en cations de la roche-mère, de la fréquence et de l'importance de l'apport de cations (surtout Ca) et de l'importance de lessivage. Les terres riches en calcaire actif ont un taux V voisin de 80 à 90 % et les terres formées sur roche-mère sableuse ont un taux V souvent inférieur à 20 %.

- **RETRAIT LINEAIRE** : c'est la mesure de réduction de taille d'une masse de terre argileuse façonnée après séchage qui s'exprime souvent en % par rapport à la taille initiale. Les kaolinites ont un retrait linéaire au séchage de l'ordre de 3 à 10 %, les illites de 4 à 11 % et les montmorillonites de 12 à 23 %.

- **RESISTANCE SECHE** : la résistance à la rupture transversale à l'état sec peut atteindre des valeurs très variables selon les argiles et dépend de la distribution et de la taille des particules, de leur perfection et de leur cristallinité mais aussi de la nature des ions échangeables. Les kaolinites ont une résistance de l'ordre de 0,7 à 50 daN/cm², les illites de 15 à 70 daN/cm² et les montmorillonites de 20 à 60 daN/cm².

PROPRIETES FONDAMENTALES

L'étude exhaustive des propriétés de la terre n'est pas toujours nécessaire. Il convient surtout de connaître quelques propriétés fondamentales qui sont :

- 1 - **GRANULARITE** : ou texture de la terre qui est la quantité centésimale en cailloux, graviers, sables, limons, argiles et colloïdes.
- 2 - **PLASTICITE** : ou aptitude de la terre à être modelée.
- 3 - **COMPRESSIBILITE** :ou potentialité de la terre de réduire au maximum sa porosité.
- 4 - **COHESIVITE** : ou propriété des particules de la terre de rester associées.

1 - GRANULARITE

Encore nommée texture d'une terre, elle représente la teneur centésimale en fractions de grains différents mesurées en pourcentages. La texture d'une terre se mesure par analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers : cailloux, graviers, sables et limons et par sédimentométrie pour les fines argileuses. La classification des fractions de grains adoptée par un grand nombre de laboratoires et référente aux normes (A.S.T.M., AFNOR) est la suivante :

> V	CAILLOUX	:	200 mm -	20 mm
V	GRAVIERS	:	20 mm -	2 mm
IV	SABLES GROSSIERS	:	2 mm -	0,2 mm
III	SABLES FINS	:	0,2 mm -	0,06 mm
II	LIMONS	:	0,06 mm -	0,02 mm
IIA	LIMONS FINS	:	0,02 mm -	0,002 mm
I	ARGILES	:	0,002 mm -	0 mm

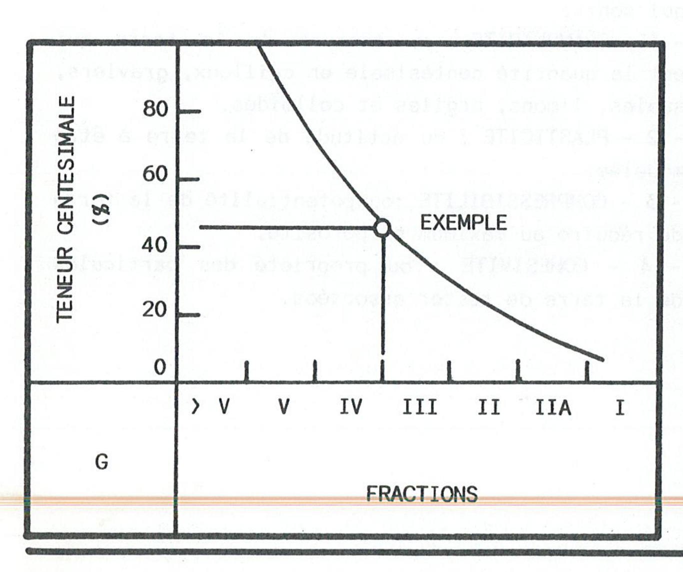
La représentation de la granularité d'une terre est une courbe granulométrique portée sur le diagramme "G".

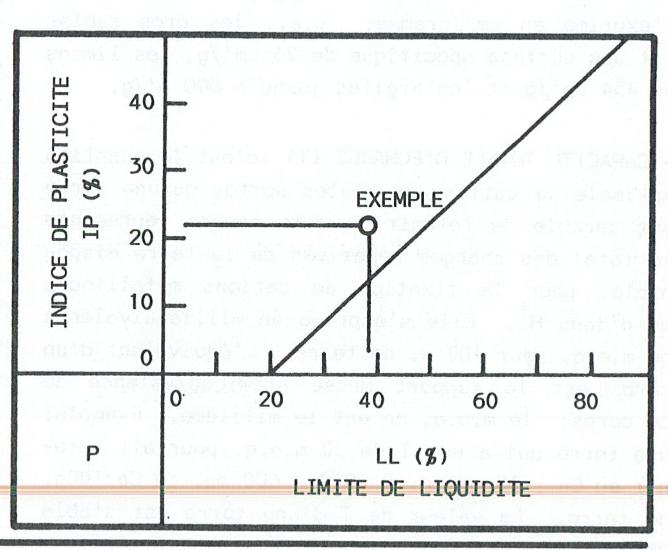
2 - PLASTICITE

La plasticité définit la propriété de la terre de subir des déformations sans réaction élastique notoire caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation.

La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg. Elles s'effectuent sur la fraction "mortier fin" de la terre (ϕ des particules <0,4 mm). La quantité d'eau, exprimée en pourcentage,qui correspond à la limite de transition entre l'état de consistance fluide et l'état plastique est nommée Limite de Liquidité (LL). Entre l'état plastique et l'état solide, la transition est nommée Limite de Plasticité (LP). A LL, le sol commence à manifester une certaine résistance au cisaillement. A LP, la terre cesse d'être plastique et devient cassant.

L'Indice de Plasticité (IP) égal à LL - LP précise la plage de comportement plastique de la terre. La combinaison de LL et de IP précise la sensibilité de la terre aux variations d'humidité. Les propriétés plastiques d'une terre sont représentées sur le diagramme de plasticité "P".





3 - COMPRESSIBILITE

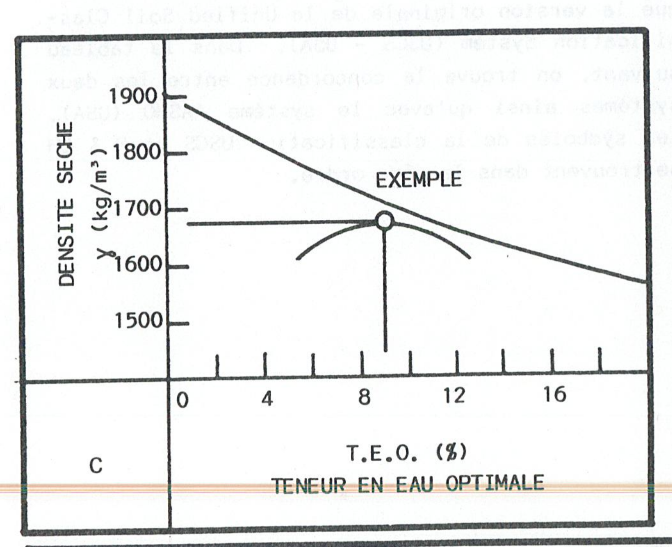
La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser comprimer au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donnés (teneur en eau optimale ou T.E.O.). Lorsqu'un volume de terre est soumis à l'action d'une force, le matériau est comprimé et l'indice des vides décroît. Plus la densité d'une terre peut être augmentée, plus sa porosité est bloquée et moins l'eau peut avoir l'occasion d'y pénétrer. Cette propriété résulte de l'imbrication plus étroite des particules qui réduit les risques de perturbation de la structure sous l'action de l'eau.
La compressibilité d'une terre est mesurée par l'Essai Proctor. On représente la compressibilité d'une terre sur le diagramme de compressibilité "C" où sont mis en relation la Teneur en Eau Optimale et la Densité Sèche Optimale, pour une énergie de compression donnée.

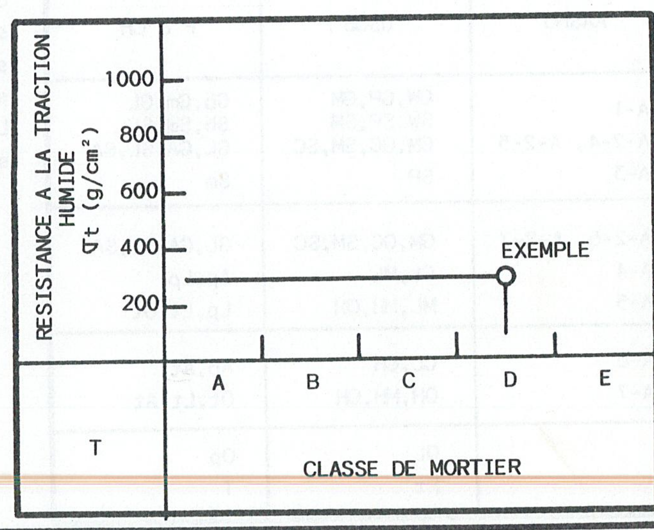
4 - COHESIVITE

La cohésivité d'une terre exprime la capacité de ses particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction. La cohésivité d'une terre dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier (fraction de grains de ∅ < 2 mm) qui lie les grains inertes entre eux. Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité collante des argiles.
On peut classer les mortiers grossiers de la façon suivante :

A	Mortier Sableux
B	Mortier Maigre
C	Mortier Moyen
D	Mortier Gras
E	Argiles

La cohésivité se mesure par l'Essai de Traction à l'état humide ou encore dénommée par l'Essai du "8". La cohésivité d'une terre est représentée sur un diagramme de résistance à la traction "T".





La classification géotechnique est la mieux adaptée à la construction en terre. Elle dépend de :

. La granularité (directement);
. La plasticité (directement);
. La compressibilité (indirectement);
. La cohésivité (indirectement);
. La quantité de matières organiques.

Elle est indépendante de :

. L'état hydrique de la terre;
. La densité de la terre in situ;
. Les constituants gazeux et liquides.

Il existe de nombreux systèmes de classification géotechnique différents. Leurs variantes conduisent à des confusions. En principe, il est préférable de s'en référer aux classifications régionales adaptées aux conditions locales. Aucun système n'a été spécifiquement adapté à la construction en terre. Les systèmes qui sont reproduits ici sont parmi les plus intéressants. Ils ont été légèrement simplifiés et adaptés aux essais spécifiquement recommandés pour la construction en terre.

CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE D'APRES AASHO M 145 (USA)

CLASSIFICATION AASHO	MATERIAUX GRANULAIRES (35% ou moins de grains passant au tamis de 0,08 mm)							MATERIAUX LIMONEUX-ARGILEUX (plus de 35% de grains passant au tamis de 0,08 mm)			
CLASSIFICATION DES GROUPES	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
% DE GRAINS PASSANT LE TAMIS DE											
2 mm	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
0,4 mm	30 max	50 max	51 max	-	-	-	-	-	-	-	-
0,08 mm	50 max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LL	-		-	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
IP	6 max		N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11*min
PRINCIPAUX MATERIAUX	fragments de pierres, graviers et gros sables		sables fins	graviers et sables limoneux ou argileux				sols limoneux		sols argileux	

* Pour A-7-5 IP ⩽ LL-30
Pour A-7-6 IP > LL-30

N.P. = Non Plastique

CONCORDANCE DES SYMBOLES		
AASHO	USCS	P & CH
A-1 A-2-4, A-2-5 A-3	GW,GP,GM SW,SP,SM GM,GC,SM,SC SP	Gb,Gm,GL Sb,Sm,SL GL,GA,SL,SA Sm
A-2-6, A-2-7 A-4 A-5	GM,GC,SM,SC CL,ML ML,MH,OH	GL,GA,SL,SA Ap,Lp Lp,Lt,Ot
A-6 A-7	CL,CH OH,MH,CH	Ap,At Ot,Lt,At
	OL Pt	Op T

La classification géotechnique des Ponts et Chaussées (P & CH - France) adopte d'autres symboles que la version originale de la Unified Soil Classification System (USCS - USA). Dans le tableau suivant, on trouve la concordance entre les deux systèmes ainsi qu'avec le système AASHO (USA). Les symboles de la classification USCS et P & CH se trouvent dans le même ordre.

CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE P & CH ET USCS				SYMBOLES	DESIGNATION
Plus de la moitié des éléments ont un Ø supérieur à 0,08 mm SOLS GRENUS	Plus de la moitié des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm TERRES GRAVELEUSES	Sans fines	Tous les diamètres de grains sont représentés, aucun ne prédomine	Gb	Grave propre bien graduée
			Une dimension de grains ou une fraction de grains prédomine	Gm	Grave propre mal graduée
		Avec fines	Les éléments fins n'ont pas de cohésion	GL	Grave limoneuse
			Les éléments fins sont cohérents	GA	Grave argileuse
	Plus de la moitié des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm TERRES SABLEUSES	Sans fines	Tous les diamètres de grains sont représentés, aucun ne prédomine	Sb	Sable propre bien gradué
			Une dimension de grains ou une fraction de grains prédomine	Sm	Sable propre mal gradué
		Avec fines	Les éléments fins n'ont pas de cohésion	SL	Sable limoneux
			Les éléments fins sont cohérents	SA	Sable argileux
La moitié des éléments ou davantage ont un Ø inférieur à 0,08 mm SOLS FINS - ARGILE ET LIMON	Limite de liquidité LL < 50 % TERRES ARGILEUSES ET LIMONEUSES	Sus A		Ap	Argiles peu plastiques
		Sous A	Inorganique	Lp	Limons peu plastiques
			Matières organiques	Op	Limons et Argiles organiques peu plastiques
	Limite de Liquidité LL > 50 %	Sus A		At	Argiles très plastiques
		Sous A	Inorganique	Lt	Limons très plastiques
			Matières organiques	Ot	Limons et Argiles organiques très plastiques
Les matières organiques prédominent. Reconnaissables à l'odeur, la couleur sombre, la texture fibreuse, la faible densité humide				T	Tourbes et autres sols très organiques

NOTES

- Cette classification est une version simplifiée et adaptée.
- On ne tient pas compte des éléments de diamètre supérieur à 60 mm.
- Le poids des fractions granulaires peut être estimé.
- Les fractions granulaires correspondent au diagramme granulométrique "G".

P

INDICE DE PLASTICITE IP (%)

50
40
30
20
10
7
4
0

LIGNE A
At
Ap
Ot
Lt
Ap ou Lp
Ap
Op
Lp
Lp

10 30 50 70 90

LL (%)

LIMITE DE LIQUIDITE

La classification pédologique moderne prend en compte l'ensemble du profil d'un sol et met l'accent sur le processus de formation et d'évolution en s'appuyant sur :
- le degré d'évolution et de différentiation du profil;
- le mode de formation et d'altération des argiles;
- les processus physico-chimiques de base qui sont à l'origine du sol, souvent liés aux matières organiques.

La classification de Ph. Duchaufour (Centre de Pédologie du CNRS, France) traduit cette dernière tendance actuelle. On peut trouver des tableaux de correspondance entre cette classification et d'autres, notamment la classification FAO dans la littérature spécialisée.

CLASSIFICATION DE DUCHAUFOUR (présentation simplifiée) (1)

1 - DIVISION 1 : SOLS DONT LA PEDOGENESE EST TRES LIEE A L'EVOLUTION DES MATIERES ORGANIQUES (généralement sous climats tempérés et froids).

Classe 1 - SOLS PEU EVOLUES
- climatiques : **SOLS DESERTIQUES, SOLS GELES OU CRYOSOLS** (profil AC ou AR - matière organique rare);
- d'érosion : **REGOSOLS, LITHOSOLS** (profil AC - horizon humifère net);
- d'apport : **SOLS ALLUVIAUX ET COLLUVIAUX** (déposés par volcans ou cours d'eau) (profil AC - horizon humifère net).

Classe 2 - SOLS PEU DIFFERENCIES, humifères, désaturés (à profil AC)
Présentent un profil uniformément coloré par l'humus, un humus riche en complexes organo-métalliques rapidement insolubilisés.
- pauvres en alumine : **RANKERS** (sur roches cristallines);
- riches en alumine : **ANDOSOLS** (sur roches volcaniques).

Classe 3 - SOLS CALCIMAGNESIQUES
Caractérisés par un blocage de l'humification à un stade précoce par le calcaire actif. Forte incorporation d'humus peu évolué dans le profil.
- humifères : **RENDZINES** (horizon humifère foncé, épais - bien représentés en zone méditerranéenne);
- peu humifères : **SOLS CALCIMAGNESIQUES BRUNIFIES** (bruns calcaires, bruns calciques);
- très humifères : **SOLS HUMO-CALCAIRES ET LITHOCALCIQUES HUMIFERES** (peu ou plus de carbonate actif - montagne).

Classe 4 - SOLS ISOHUMIQUES
Caractérisés par une incorporation profonde, par voie biologique, de matière organique stabilisée par une maturation climatique prolongée.
- à complexe saturé : **CHERNOZEMS, SOLS CHATAINS, SOLS GRIS FORESTIERS** (couleur foncée - steppes);
- à complexe désaturé : **BRUNIZEMS** (sol de prairie en climat continental humide);
- sous climat de plus en plus aride : **SOLS MARRONS** (rougeâtre), **SIEROZEMS** (gris).

Classe 5 - VERTISOLS
Sols à argile gonflante : incorporation profonde, par "mouvements vertiques" (par les fissures) de complexes organo-minéraux très stables et de couleur foncée (argile gonflante + humus stable).
Saison sèche marquée.
- **VERTISOLS** (foncés) (30 à 40 % d'argiles gonflantes - black cotton soils);
- **SOLS VERTIQUES** (colorés) (montmorillonites et interstratifiés semi-gonflants).

Classe 6 - SOLS BRUNIFIES à profil A (B) C ou ABC peu distinct
Caractérisés par un humus peu épais, résultant surtout de l'insolubilisation par le fer libre suffisamment abondant, et formant "pont ferrique" avec l'argile.
- **SOLS BRUNS** à horizon B d'altération;
- **SOLS LESSIVES** à horizon B d'accumulation d'argile;
- **SOLS LESSIVES CONTINENTAUX OU BOREAUX.**

Classe 7 - SOLS PODZOLISES
Matière organique peu évoluée formant des complexes organo-minéraux mobiles. Horizons sableux ou graveleux très distinct : A2 clair et B foncé.
- **SOLS PODZOLIQUES ET PODZOLS** non ou peu hydromorphes;
- **SOLS PODZOLIQUES ET PODZOLS** hydromorphes (à nappe).

2 - DIVISION 2 : SOLS DONT LA PEDOGENESE :
. EST ASSEZ INDEPENDANTE DE L'EVOLUTION DES MATIERES ORGANIQUES;
. EST TRES LIEE AU CONTRAIRE AU CLIMAT CHAUD, PLUS OU MOINS HUMIDE ET AU COMPORTEMENT PARTICULIER DES OXYDES DE FER ET D'ALUMINE

Classe 9 - SOLS FERSIALLITIQUES

Evolution des oxydes de fer du type "rubéfaction". Formation dominante d'argile de type 2/1 (transformation et néoformation). Climats du type méditerranéen et tropical sec.

- rubéfaction incomplète : SOLS BRUNS FERSIALLITIQUES;
- rubéfaction complète, complexe saturé ou presque : SOLS ROUGES FERSIALLITIQUES;
- désaturation et dégradation partielle du complexe : SOLS FERSIALLITIQUES ACIDES.

Classe 10 - SOLS FERRUGINEUX

Abondance des oxydes de fer cristallisés (goethite et hématite), altération encore incomplète des minéraux primaires : argile 1/1 de néoformation dominante (kaolinite), mais en mélange avec argiles 2/1.

- altération encore incomplète : SOLS FERRUGINEUX;
- altération plus complète : FERRISOLS.

Classe 11 - SOLS FERRALLITIQUES

Altération complète des minéraux primaires (sauf quartz). Argiles 1/1 uniquement. Teneur élevée en sesquioxydes : Oxydes de fer et d'alumine cristallisés. Dans les régions tropicales les plus humides.

- SOLS FERRALLITIQUES au sens strict (kaolinite dominante);
- SOLS FERRALLITIQUES hydromorphes.

3 - DIVISION 3 : SOLS DONT LA PEDOGENESE EST LIEE A DES CONDITIONS LOCALES DE STATION

Classe 8 - SOLS HYDROMORPHES

(dont l'aspect est conditionné par l'eau). Ce sont des sols saturés de façon temporaire ou permanente par un excès d'eau.

Oxydo-réduction du fer liée à la présence permanente ou temporaire d'une nappe.

- oxydo-réduction marquée (sols à nappe) : PSEUDOGLEY, STAGNOGLEY, GLEY (couleur grise souvent avec taches jaunes, rouges ou rouille);
- oxydo-réduction atténuée : hydromorphie par imbibition capillaire d'un matériau argileux et appauvrissement superficiel en argile : PELOSOLS, PLANOSOLS.

Classe 12 - SOLS SALSODIQUES

Ils sont fréquents en zone méditerranéenne et en zone sèche intertropicale. Sols dont l'évolution est dominée par la présence de sel soluble, chlorure, sulfate, etc ..., soit par la présence de Na^+ sous deux formes :

- forme saline : SOLS SALINS;
- forme sodium échangeable : SOLS ALCALINS.

CORRESPONDANCE ENTRE CLASSIFICATION FAO ET DUCHAUFOUR

FAO	DUCHAUFOUR	FAO	DUCHAUFOUR
FLUVISOLS	SOLS ALLUVIAUX et COLLUVIAUX	CHERNOZEMS	CHERNOZEMS
GLEYSOLS	GLEY	CAMBISOLS	SOLS PEU EVOLUES SOLS BRUNS (tropicaux) SOLS FERRUGINEUX (non sableux)
REGOSOLS	REGOSOLS	LUVISOLS	SOLS LESSIVES FERRISOLS
LITHOSOLS	LITHOSOLS	PLANOSOLS	PLANOSOLS
ARENOSOLS	SOLS FERRALLITIQUES (sableux)	AERISOLS	SOLS FERRALLITIQUES (fortement désaturés)
RENDZINAS	RENDZINES	NITOSOLS	SOLS FERRALLITIQUES (moyennement désaturés)
RANKERS	RANKERS	FERRALSOLS	SOLS FERRALLITIQUES (non désaturés)
ANDOSOLS	ANDOSOLS	FERRISOLS	SOLS FERRALLITIQUES SOLS FERRUGINEUX (entre - et -)
VERTISOLS	VERTISOLS	HISTOSOLS	SOLS TOURBEUX
SOLONTCHAK	SOLS SALINS		
SOLONETZ	SOLS ALCALINS		
YERMOSOLS	SIEROZEMS		
XEROSOLS	SOLS BRUNS (subarides)		
CASTANOZEMS	SOLS MARRONS SOLS CHATAINS		

Il existe des terres particulières dont les dénominations sont spécifiques à chaque discipline : agriculture, géotechnique ou pédologie. Les appellations suivantes sont les plus fréquemment employées dans la littérature.

1 - LATERITES

Dans les régions tropicales et subtropicales humides, la désagrégation de la roche-mère et l'altération chimique associée au lessivage et évaporation conduisent à une accumulation de sesquioxydes dans l'horizon B (surtout de fer). Les sols latéritiques sont caractérisés par une désagrégation très avancée et par une concentration de ces hydroxydes métalliques. Certaines latérites sont plus riches en composés alumineux : ce sont les bauxites. Les sols latéritiques n'ont qu'une faible couche de matière organique. Suivant leur situation, les latérites sont de consistance tendre, sableuse ou argileuse, ou au contraire dure et caillouteuse. Leur durcissement rapide à l'air est caractéristique. Au-delà de ces indications générales, les spécialistes n'ont pas encore donné une définition exacte et unique des latérites. Le rapport chimique $SiO_2/Al_2O_3 < 1,33$ s'est longtemps imposé quoique souvent contesté. On admettait récemment que le rapport pouvait être voisin de 2, le plus souvent inférieur mais aussi du côté supérieur. En pédologie, le terme latérite, trop général, est remplacé par des dénominations multiples qui reflètent la spécificité des sols : sols fersiallitiques, ferrugineux ou ferrallitiques. Encore aujourd'hui, la définition généralement retenue est celle de Buchanan (1807), qui a d'ailleurs suggéré le nom Latérite (du latin later : brique).
On retiendra cependant ici la définition présentée par Mukerji (1) "Les latérites sont des terres très altérées, qui contiennent des proportions importantes mais très variables d'oxydes de fer et d'aluminium, ainsi que du quartz et d'autres minéraux. On les trouve abondamment dans la ceinture tropicale et subtropicale, généralement juste en-dessous de la surface des immenses plaines ou clairières, dans des régions avec une précipitation importante. Leur caractéristique d'ameublissement naturel varie du conglomérat compact à la terre friable. La couleur est très variable : ocre, rouge, brune, violette et noire. Le matériau est facile à découper, et il durcit très vite à l'air, et devient assez résistant aux agents météorologiques".
Ce sont donc les propriétés d'induration (durcissement rapide et important) qui sont essentielles. Pour la plinthite, une variété de latérite, cette induration est rapide, forte et irréversible. Elle est assez rare (Inde, Haute-Volta, p.e.). Selon la richesse en fer de la roche-mère, l'humidité du climat et la topographie, le degré de rubéfaction (lente déshydratation des oxydes de fer et cristallisation sous forme de Fe_2O_3 : hématite), la couleur des latérites est variable:presque noire, rouille, rouge foncé et rouge en cas de dessèchement extrême (hématite, Fe_2O_3), ocre rouge si le dessèchement est plus modéré (goethite, $Fe_2O_3H_2O$). La stilpnosidérite ($Fe_2O_3 2H_2O$) donne une couleur jaune ocre, en milieu humide. La présence prépondérante d'aluminium donne des couleurs rouge clair, rose-blanc et ocre. La gibbsite ($Al(OH)^3$), la boemite (AlO-OH) et la diaspore ($H\text{-}AlO_2$) sont plus ou moins incolores ou grisâtres et transparents.
Les caractéristiques physiques des latérites sont très variables. La masse volumique varie de 2 500 à 3 600 kg/m³. Leur dureté s'élève avec la concentration d'oxydes de fer et va de pair avec une couleur de plus en plus foncée, et l'induration avancée peut conduire à la formation de carapaces. Ces cuirasses ferrugineuses peuvent être épaisses de quelques cm à plus de 1 m.

2 - TERRA ROSSA ET TERRA FUSCA

Ce sont des argiles de très lente décarbonatation formées sur des couches épaisses de calcaire dur et pauvre en argile, avant la dernière glaciation,quand dominait le climat méditerranéen ou même tropical. La terra rossa, rouge, se distingue de la terra fusca, brune, par sa rubéfaction. La terra rossa se rencontre dans la plupart des régions méditerranéennes. PLus au Nord, ce sont des sols fossiles qui se brunifient (faire apparaître la couleur brune de l'association argile-fer) progressivement en surface. Ces sols brunifiés gardent leur teinte rouge en profondeur.

3 - TERRES NOIRES TROPICALES

Ces sols se rencontrent dans les régions tropicales humides et se développent sur des roches volcaniques (basalte p.e.). Leur nom plus connu est celui de "black cotton soils", dérivé de leur couleur sombre (noir ou gris et brun foncés) et du fait que ces sols sont souvent cultivés de coton(Inde p.e.). Ils sont riches en carbonate de calcium et très argileux. Les argiles dominantes sont des montmorillo-

nites avec une capacité d'échange d'ions très élevée. Jusqu'à 90 % des argiles peuvent avoir un diamètre inférieur à 0,15 μ. Le gonflement impressionnant à l'humidité et un fort retrait au séchage sont notoires. A l'état sec, ces sols sont très durs. En Inde, ils couvrent près de 500 000 km². On les rencontre aussi en Argentine du Nord et dans plusieurs pays d'Afrique. Au Maroc, ils sont nommés "tirs" (plaines de Gharb et du Loukkos). Les black cotton soils ont des limites de liquidité LL de l'ordre de 35 à 120 % et des indices de plasticité IP de 10 à 80 % et plus. Leur retrait linéaire va classiquement de 8 à 18 %. P.e., les tirs marocains ont une LL de 50 à 70 % et un IP de 30 à 50 %; leur retrait est de 10 à 12 %. Au Soudan, les "Badobe" ont une LL de 47 à 93 %, un IP de 13 à 58 % et un retrait de 8 à 18 %.

4 - LOESS

C'est un dépôt éolien, fin et homogène, de texture limoneuse, pauvre en sables, contenant 10 à 20 % de carbonate de calcium. Le matériau originel provient des régions désertiques (arraché au désert de Gobi pour la Chine, p.e.) ou des régions périphériques des grands glaciers : dépôts morainique (en Europe, p.e.). Les couches de loess sont épaisses de quelques dizaines de cm à 1 ou 2 dizaines de m. Le loess est très friable. On le creuse sans difficulté (habitat creusé en Chine du Nord p.e.).

5 - ROCHES ARGILEUSES

Elles forment la majorité des roches sédimentaires (80 %). Les argiles plastiques du groupe des phyllosilicates en sont le meilleur exemple. Mais ce sont aussi les Shales, roches silico-alumineuses plus connues sous le nom de shistes ou d'ardoises qui sont non plastiques à l'état humide. C'est encore le Marl, minéraux argileux mélangés à des particules carbonatées. Quand le liant de ces roches est de l'argile, on est en présence de terre. Lorsque c'est un ciment naturel (tuf calcaire p.e.), il s'agit d'une roche. Cette distinction importe car un même terme régional peut désigner des matériaux très différents. P.e., au Mexique, le terme Tepetate désigne autant le Calcrete (graviers cimentés par du tuf calcaire) que des terres ou des roches très calcaires, ou de la craie. De même aux USA, avec les termes Caliche ou Chalk ou en Tunisie avec la Torba. D'autres termes portent la même confusion : marne, tuf, craie, mergel, Bhata, Dhandla,... On observe souvent de fortes teneurs en carbonate de chaux ($CaCo_3$), de 50 à 75 % et des teintes variant de l'ocre au blanc. L'indice de plasticité diminue avec l'augmentation des carbonates. P.e., en Tunisie, on a des IP de 20 % pour 75 % de $CaCO_3$ et de 13 % pour 90 % de $CaCO_3$. La granularité est difficile à déterminer car ces terres sont en induration et se désintègrent mal dans l'eau. Elles demeurent cependant assez friables à l'état sec.

6 - TERRES SALINES

Elles sont riches en chlorure de sodium (NaCl) ou en sulfate de sodium (Na_2SO_4). On les rencontre surtout sous climat sec, semi-désertique, steppique ou tropical sec où la forte évaporation supprime tout drainage climatique. On les rencontre aussi sur un matériau enrichi en sel ou à proximité d'une nappe salée. Sous climat aride, ces sols sont proches des grandes dépressions salées subdésertiques (Sebkhas ou Chotts d'Afrique du Nord, Playas d'Amérique du Nord, Takyr d'Asie Centrale) et dans les grandes vallées irriguées : Egypte, Lybie, Israël, Syrie, Irak, Turquie. Sous climat humide les terres salées n'existent qu'à proximité de la mer (Polders des climats tempérés, Mangroves en climat équatorial).

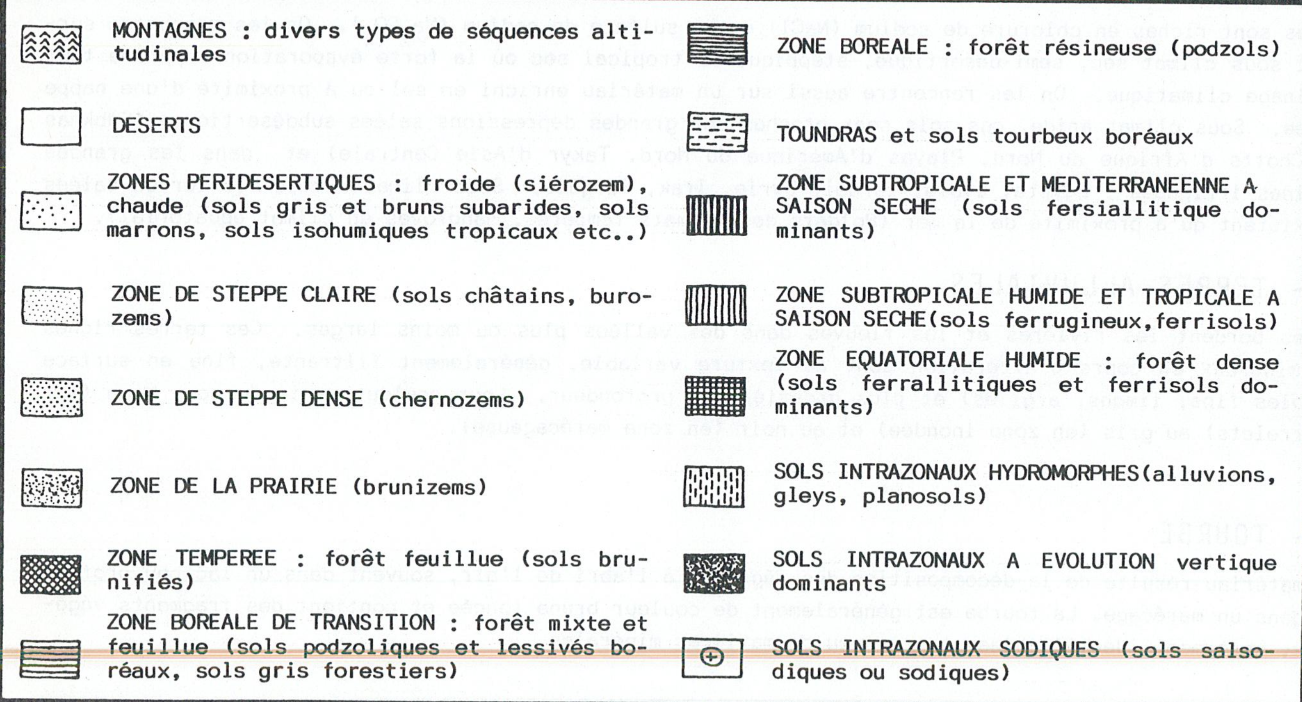
7 - TERRES ALLUVIALES

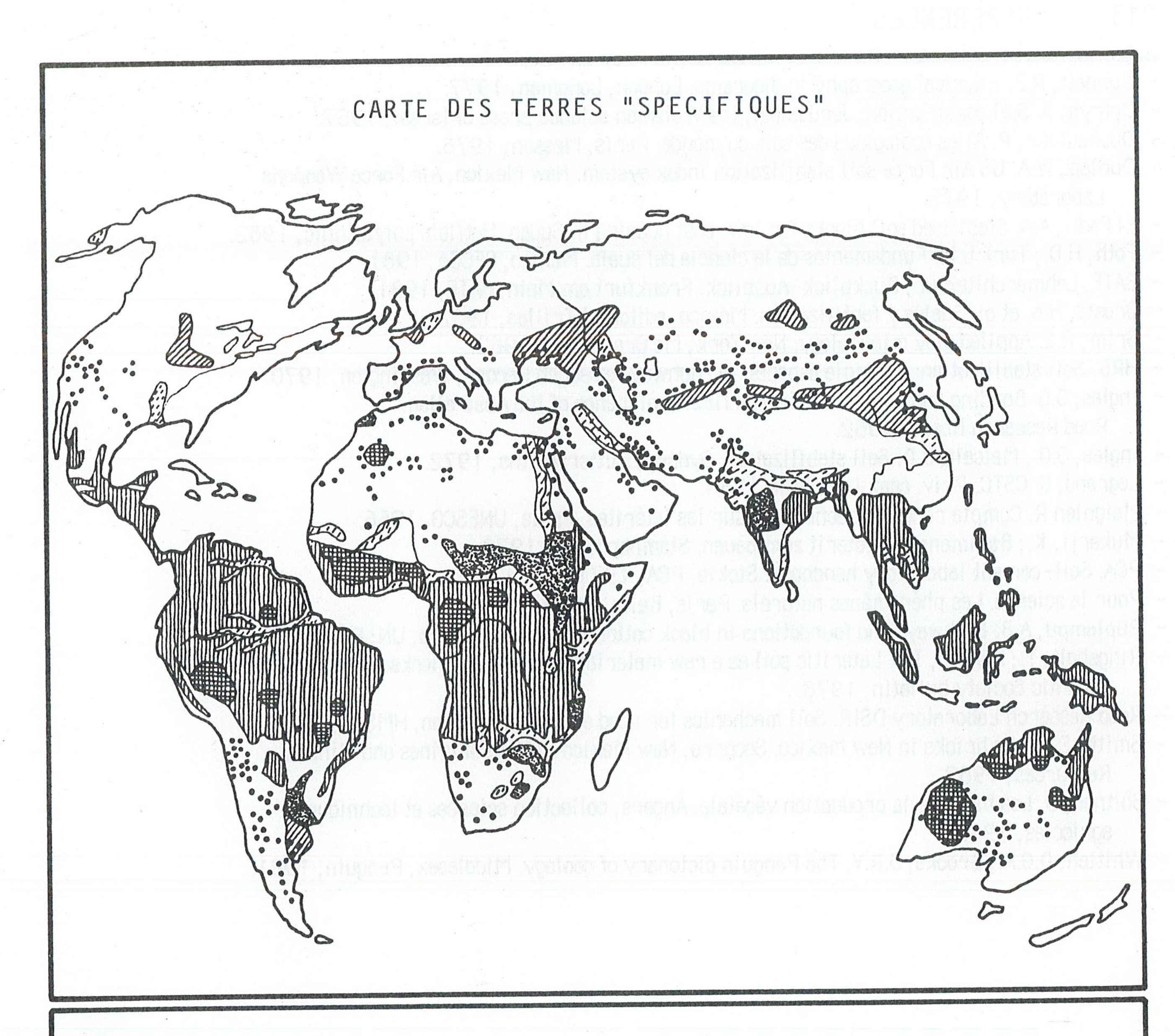
Elles bordent les rivières et les fleuves dans des vallées plus ou moins larges. Ces terres riches en minéraux en cours d'altération sont de texture variable, généralement filtrante, fine en surface (sables fins, limons, argiles) et plus grossière en profondeur. Leur couleur varie du ocre brun (sur bourrelets) au gris (en zone inondée) et au noir (en zone marécageuse).

8 - TOURBE

Ce matériau résulte de la décomposition des végétaux à l'abri de l'air, souvent dans un lac peu profond ou dans un marécage. La tourbe est généralement de couleur brune foncée et contient des fragments végétaux, nettement identifiables et très peu de matières minérales.

CARTE DES PRINCIPAUX SOLS "PEDOLOGIQUES"





▥	LATERITES
▦	CROUTES FERRUGINEUSES
▨	LOESS
▩	TERRES TROPICALES NOIRES
░	TERRES ALLUVIALES
⁘	TERRES SALINES

- Bunnett, R.B. Physical geography in diagrams. London, Longman, 1977.
- Cytryn, S. Soil construction. Jerusalem, the Weizman science press of Israël, 1957.
- Duchaufour, P. Atlas écologique des sols du monde. Paris, Masson, 1976.
- Dunlap, W.A. US Air Force soil stabilization index system. New Mexico, Air Force Weapons Laboratory, 1975.
- El Fadil, A.A. Stabilised soil blocks for low-cost housing in Sudan. Hatfield polytechnic, 1982.
- Foth, H.D.; Turk L.M. Fundamentos de la ciencia del suelo. México, CECSA, 1981.
- GATE. Lehmarchitektur, Rückblick-Ausblick. Frankfurt am Main, GATE, 1981.
- Graetz, H.A. et al. Suelos y fertilización. México, editorial Trillas, 1982.
- Grim, R.E. Applied clay mineralogy. New York, Mc Graw-Hill, 1962.
- HRB. Soil stabilization: multiple aspects. In Highway Research Record, Washington, 1970.
- Ingles, O.G. Bonding forces in soils. In The first conference of the Australian Road Research Board, 1962.
- Ingles, O.G.; Metcalf, J.B. Soil stabilization. Sydney, Butterworths, 1972.
- Legrand, C. CSTC. Priv. com. Limelette, 1984.
- Maignien R. Compte rendu de recherches sur les latérites. Paris, UNESCO, 1966.
- Mukerji, K.; Bahlmann, H. Laterit zum bauen. Stamberg, IFT, 1978.
- PCA. Soil-cement laboratory handbook. Stokie, PCA, 1971.
- Pour la science. Les phénomènes naturels. Paris, Belin, 1981.
- Puplampu, A.B. Highways and foundations in black cotton soils. Addis Ababa, UN; ECA, 1973.
- Ringsholt, T.; Hansen, T.C. Lateritic soil as a raw material for building blocks. In American Ceramic Society bulletin, 1978.
- Road Research Laboratory DSIR. Soil mechanics for road engineers. London, HMSO, 1958.
- Smith, E. Adobe bricks in New Mexico. Socorro, New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, 1982.
- Soltner, D. Les bases de la production végétale. Angers, collection sciences et techniques agricoles, 1982.
- Whitten, D.G.A.; Brooks, J.R.V. The Penguin dictonary of geology. Middlesex, Penguin, 1981.

300 IDENTIFICATION DES TERRES

L'identification correcte est un pas essentiel dans le processus de décision concernant le choix d'une technologie de transformation de la terre en matériau de construction.

Il y a une grande variété d'essais qui peuvent être effectués sur la terre, mais en fait, il n'y a qu'un nombre assez restreint d'essais qui permettent une interprétation directe de l'adéquation de la terre à la construction et qui sont donc utiles.

On distingue des essais de terrain et des essais de laboratoire.

Tous les deux servent à fournir les informations nécessaires à la décision concernant l'utilisation de la terre, mais les essais de terrain peuvent également donner une indication quant à l'opportunité de passer par les essais de laboratoire qui sont évidemment plus sophistiqués, plus longs à exécuter et surtout beaucoup plus coûteux.

PROCEDURE D'IDENTIFICATION

Du fait de sa grande hétérogénéité naturelle, la terre pose des problèmes d'identification. Il est indispensable d'identifier une terre avec précision si l'on veut réaliser une économie sur la production des matériaux en terre crue et sur leur emploi en construction. Pour des travaux simples, un diagnostic d'identification basé sur l'expérience peut suffire mais l'on doit s'assurer de la concordance des signes du diagnostic. Si l'on constate des contradictions, il y aura lieu de pratiquer des tests de laboratoire complémentaires. Pour des travaux importants l'identification doit être poussée au point de permettre une sélection des tests de contrôle appropriés et pour supprimer ceux qui sont inutiles; car la procédure d'identification complète peut être fastidieuse. Une bonne identification de base de la terre peut donc assurer un gain de temps et d'argent non négligeable. Mais l'on jugera de l'utilité ou de l'inutilité des tests de contrôle en connaissance des propriétés du matériau et de ses composants principaux, de leurs caractéristiques physiques et mécaniques fondamentales et à l'aide d'un matériel de référence fiable (tableaux, abaques p.e.). On se souviendra que la terre est un matériau complexe et que l'identification seule n'assure pas forcément un emploi correct en construction, qu'il est aussi nécessaire de réaliser quelques essais d'évaluation des performances mécaniques du matériau de construction.

La procédure générale précisée par la suite n'est pas limitative et peut être complétée par d'autres procédures. Il est recommandé d'exploiter les connaissances locales ou les savoir-faire traditionnels ainsi que les procédures d'autres disciplines : géologie, agronomie, pédologie p.e., qui peuvent fournir des indices d'interprétation.

Trois étapes sont nécessaires pour identifier et classer une terre :

1° étape : identification des caractéristiques et des propriétés de base des composants de la terre qui vont influencer le comportement mécanique du matériau; ce sont des analyses préliminaires de terrain, visuelles et manuelles.

2° étape : on rédige une description du sol en consignant les caractéristiques et propriétés de base identifiées grâce aux analyses préliminaires. Cette information descriptive est nécessaire pour différencier la terre analysée par rapport à un groupe descriptif plus large.

3° étape : si les analyses de terrain n'ont pas permis une classification assez précise,on réalise des analyses en laboratoire; cette démarche n'est requise que si une identification très précise est nécessaire : terres très particulières, précisions minéralogiques p.e. On pourra alors classer la terre dans un groupe et même un sous-groupe en lui assignant un symbole de classification.

SOURCES D'INFORMATION

Avant de travailler sur le terrain, il convient d'exploiter les informations qui ont été enregistrées ou consignées le plus souvent sous forme de cartes et de notices descriptives: géologie, pédologie, géographie, topographie, hydrologie, pluviométrie, couvert végétal, agriculture, infrastructure routière, etc... La confrontation de ces données fournit des informations préliminaires qui peuvent orienter le travail de terrain. Au besoin, on fait intervenir les spécialistes locaux des disciplines évoquées pour une meilleure interprétation des informations disponibles. On peut aussi obtenir des renseignements auprès des stations agricoles régionales, de centres de recherches, d'universités, des services de travaux publics, des mines et ressources, des entrepreneurs de travaux publics, etc...

FICHE D'IDENTIFICATION, DOSSIER

Chaque échantillon prélevé sur le terrain reçoit une "carte d'identité". Il s'agit d'une fiche qui consigne le maximum d'informations : date et lieu de prélèvement, chantier concerné, demandeur, n° de l'échantillon et n° du sondage, profondeur de prélèvement, nom du préleveur ou sondeur,poids, remarques particulières, etc...Cette fiche d'identité est complétée au fur et à mesure et constitue un dossier par échantillon où l'on trouve : le nom typique de la terre, son symbole de groupe, la texture, la structure, la forme des grains, le diamètre maximal, la plasticité,la minéralogie, l'odeur, la couleur, l'état hydrique,la compacité, la compressibilité, la cohésion, etc...

MATERIEL D'IDENTIFICATION

Le matériel nécessaire à l'identification des terres peut être très simple - quelques objets et instruments usuels : couteaux, récipients divers - ou relativement sophistiqué - un laboratoire intégralement équipé dont l'équipement complet peut coûter jusqu'à quelques centaines de milliers de US $. On peut aussi utiliser des matériels d'importance intermédiaire : laboratoire de fortune ou même un laboratoire mobile installé dans un petit camion. Il existe aussi des petites valises de terrain compactes et très pratiques qui permettent de réaliser les essais les plus indispensables. Le matériel contenu dans ces valises de terrain doit permettre de réaliser les essais suivants : brillance, adhérence, décantation, sédimentation, granulométrie, plasticité, compactibilité (pas absolument nécessaire), cohésion, minéralogie, chimie.
Le matériel d'identification des terres que l'on évoque ici implicitement doit convenir pour réaliser la série de tests et essais la moins sophistiquée. Il est bien entendu que ce sont avant tout des essais de terrain. Il s'agit donc d'instruments et outils du type petite pioche, couteaux et spatules, récipients divers pour produits indispensables et autres ingrédients, récipient gradué, moules utiles aux tests de contraction linéaire et volumétrique p.e., mètre de poche, etc...

1 - COLLECTE DES ECHANTILLONS

On peut employer une tarrière manuelle ou mécanique (des camions sont équipés de tels outils). Les tarrières permettent une extraction rapide et à grande profondeur : jusqu'à 5 à 6 mètres avec des rallonges; 0,60 à 0,70 m sans rallonge. Les diamètres courants des têtes de tarrières varient de 6 cm à 25 cm. Leur poids est d'environ 5 kg ajoutés de 3 kg par rallonge de 1 m. Le principal défaut de cet outil est le risque de mélange des couches de surface aux couches de profondeur.
On peut aussi creuser un trou d'environ 1 m de côté sur 2 m de profondeur. On prévoit une bonne orientation au soleil afin de favoriser l'observation. Il faut veiller à la sécurité des ouvriers: risques d'éboulements dans les blocs peu cohésifs. La terre excavée est dégagée proprement et l'on y prélève aucun échantillon. La terre qui sera analysée est prélevée dans l'une des parois du trou par creusement horizontal. On peut aussi prélever les échantillons dans des talus naturels où les pendages des couches de sols sont bien définis. On prendra soin de bien dégager les végétaux et matières organiques de surface.

2 - POIDS DES ECHANTILLONS

En principe, 1,5 kg de terre suffisent pour réaliser tous les essais d'identification de base, sauf pour la compactibilité qui exige 6 à 10 kg. Si l'on veut tester au moins une brique aux dimensions de 29,5 x 14 x 9 cm, 10 kg de terre sont nécessaires. La quantité de terre à prélever sera précisée en fonction de la liste de tests et d'essais que l'on compte réaliser, en fonction de la précision recherchée qui peut exiger un doublage des tests, suivant les frais et les difficultés engagés, le coût des essais, suivant bien sûr la qualité de la terre : une terre grenue réclame un échantillon plus important qu'une terre fine.

3 - QUALITE DE L'ECHANTILLON

L'échantillon prélevé doit être représentatif d'une qualité de terre à analyser. Pour assurer cette représentation de l'échantillon, on tâchera de respecter quelques principes généraux :
- Veiller à ne pas contaminer la terre en mélangeant différents horizons de prélèvement.
- Ne rien enlever ni ajouter à l'échantillon : pas de rectification de l'état naturel.
- Effectuer des prélèvements très localisés.
- Si le sol est hétérogène, ne pas chercher à faire une "moyenne" mais multiplier les prélèvements en chaque endroit différencié.
- Pour diviser l'échantillon, le placer en forme de cône sur un tissu propre; l'aplatir et le diviser en quatre; rejeter deux parties opposées, reformer un cône et recommencer l'opération jusqu'à obtention de la quantité désirée.

4 - CONDITIONNEMENT DE L'ECHANTILLON

Les échantillons sont conditionnés dans des récipients ou sacs étanches qui ne peuvent se briser ou s'éventrer pendant le transport. Si l'on doit maintenir l'état hydrique d'origine, un conditionnement à la parafine sera utile. Les containers sont soigneusement étiquetés : l'étiquette d'identité, protégée, est si possible placée dans le container pour ne pas être altérée par les manipulations.

Sur le terrain,en prenant connaissance de la terre susceptible d'être employée pour construire, il importe de pratiquer quelques essais rapides d'identification. ces essais de terrain, simples, permettent d'apprécier certaines caractéristiques du matériau et de confirmer, ou d'infirmer, l'aptitude de la terre pour son emploi en construction. Ces essais sont assez empiriques; aussi convient-il de les répéter afin de n'en point rester à des impressions. Ces essais indiquent si des analyses complémentaires de laboratoire sont nécessaires.

1 - EXAMEN VISUEL

On examine à l'oeil la terre sèche pour apprécier l'importance de sa fraction sableuse et de sa fraction fine. On enlève les gros cailloux, les graviers et les gros sables pour faciliter l'évaluation (cette opération est également applicable à tous les essais qui suivent). La fraction fine est constituée par les graviers d'un diamètre inférieur à 0,08 mm. Ce diamètre se trouve à la limite de ce qui est distinguable à l'oeil nu.

2 - ESSAI DE L'ODEUR

On sent la terre que l'on vient d'extraire. Elle est de nature organique si l'odeur évoque le "moisi". Cette odeur est amplifiée si l'on chauffe ou humidifie la terre.

3 - ESSAI DE MORSURE

On mord une pincée de terre et on l'écrase légèrement entre les dents. La terre est sableuse si elle crisse avec une sensation désagréable. La terre est limoneuse si le crissement ne donne pas une sensation désagréable. La terre est argileuse si l'on éprouve une sensation lisse ou farineuse, ou si une pastille de terre sèche est collante quand on y applique la langue. On fera attention quant à la qualité hygiénique de l'échantillon prélevé.

4 - ESSAI DE TOUCHER

On triture la terre débarrassée de ses plus grosses particules en effritant un échantillon entre les doigts et la paume de la main. La terre est sableuse si l'on éprouve une sensation de rugosité et si elle ne présente aucune cohésion. La terre est limoneuse si l'on a l'impression d'une faible rugosité et si l'échantillon humidifié devient moyennement plastique. La terre est argileuse si, à l'état sec, elle présente des mottes ou concrétions qui résistent à l'écrasement et si elle devient plastique et collante lorsqu'elle est humidifiée.

5 - ESSAI DE LAVAGE

On se lave les mains avec de la terre légèrement mouillée. La terre est sableuse si les mains se rincent facilement. la terre est limoneuse si elle paraît pulvérulente et si les mains ne sont pas trop difficiles à rincer. La terre est argileuse si l'on a une sensation savonneuse et si les mains sont difficiles à rincer.

6 - ESSAI DE L'ECLAT

Une boulette de terre légèrement humide est coupée en deux avec un couteau. Un aspect terne de la surface entaillée indique une terre plutôt limoneuse. Un aspect brillant indique que l'on est en présence d'une terre argileuse plastique.

7 - ESSAI D'ADHERENCE

On prend une masse de terre humide qui ne colle pas aux doigts et on y enfonce une spatule ou un couteau. La terre est très argileuse si la spatule s'enfonce difficilement et si la terre y adhère lorsqu'on la retire. La terre est moyennement argileuse si la spatule pénètre sans grande difficulté et si la terre y adhère quand on la retire. La terre est peu argileuse si l'on pénètre et retire la spatule sans effort même si elle demeure sale lorsqu'on la retire.

8 - SEDIMENTATION

Les précédents essais ont permis entre autres de se faire une idée de la texture de la terre et des quantités de ses fractions distinctes ainsi que de la qualité de sa fraction fine. Mais cette idée demeure somme toute assez grossière. Il est possible de réaliser un test de sédimentation simplifiée, sur le terrain, qui apportera quelques précisions sur les quantités des fractions texturales. Le matériel utilisé est simple : un flacon de verre transparent, cylindrique à fond plat, de capacité minimale de 1 litre et dotée d'un col assez large pour pouvoir y passer la main, sans être trop large pour pouvoir l'obturer de la main. La procédure de l'essai est la suivante :

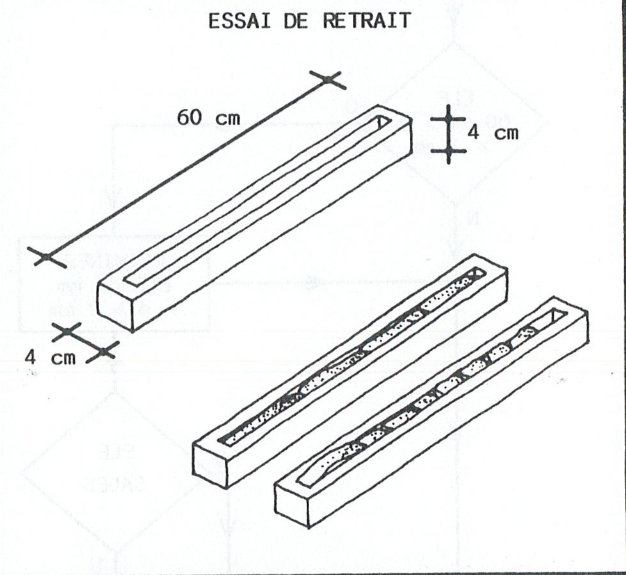
- Remplir le flacon avec de la terre jusqu'au 1/4 de sa hauteur.
- Compléter les 3/4 du volume avec de l'eau pure.
- Laisser reposer le flacon pour permettre une imprégnation de la terre. On peut faciliter cette imprégnation par une trituration manuelle.
- Obturer l'ouverture avec la main ou un couvercle approprié et agiter vigoureusement le flacon.
- Laisser décanter le mélange troublé sur une surface horizontale.
- Agiter de nouveau 1 heure après et laisser décanter.

- Environ 45 minutes après, on peut constater que les sables se sont déposés au fond du flacon, surmontés d'une couche de limon que couronne une couche d'argile. Au-dessus de l'eau surnagent des débris organiques. Restent éventuellement en suspension dans l'eau, les colloïdes extrêmement fins. Normalement, ce n'est que 8 heures après que l'on mesure les hauteurs des différentes couches précipitées. On mesure tout d'abord la hauteur totale des sédiments (100%) sans tenir compte de la hauteur d'eau claire qui les recouvre puis l'on mesure chaque couche distincte.
Ce calcul des hauteurs des couches de sédiments qui permet d'apprécier les pourcentages de chaque fraction granulaire est légèrement faussé par le fait que les fractions limoneuses et argileuses sont expansées et apparaissent donc un peu plus importantes qu'en réalité.



9 - RETRAIT

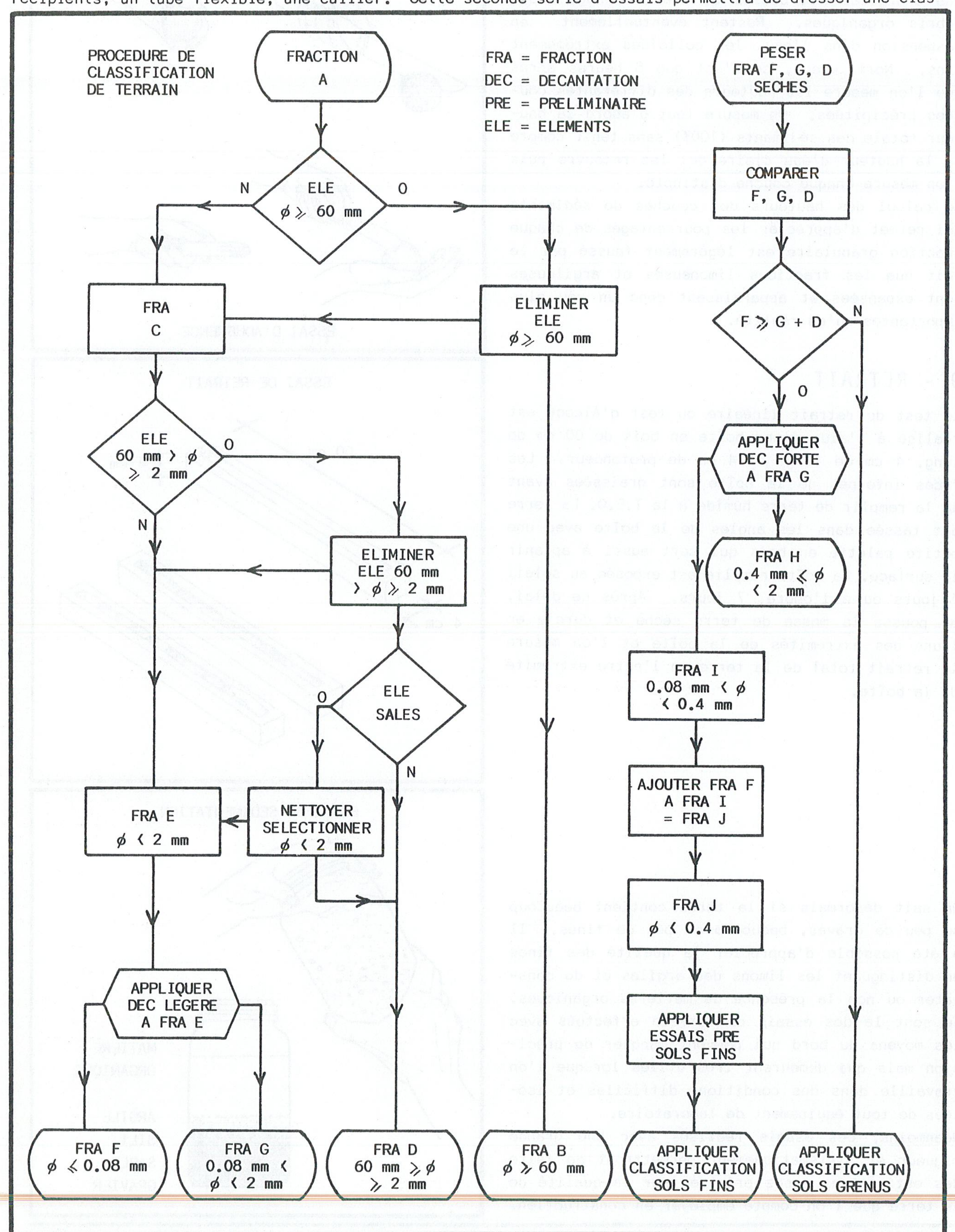
Le test de retrait linéaire ou test d'Alcock est réalisé à l'aide d'une boîte en bois de 60 cm de long, 4 cm de large et 4 cm de profondeur. Les faces internes de la boîte sont graissées avant de la remplir de terre humide à la T.E.O. La terre est tassée dans les angles de la boîte avec une petite palette en bois qui sert aussi à aplanir la surface. La boîte remplie est exposée au soleil 3 jours ou à l'ombre, 7 jours. Après ce délai, on pousse la masse de terre sèche et durcie en l'une des extrémités de la boîte et l'on mesure le retrait total de la terre en l'autre extrémité de la boîte.



On sait désormais si la terre contient beaucoup ou peu de graves, beaucoup ou peu de fines. Il a été possible d'apprécier la qualité des fines en distinguant les limons des argiles et de constater ou non la présence de matières organiques. Ce sont là des essais de terrain effectués avec les moyens du bord qui peuvent manquer de précision mais qui demeurent très utiles lorsque l'on travaille dans des conditions difficiles et isolées de tout équipement de laboratoire.
Néanmoins, ces essais réalisés avec une grande rigueur et systématiquement permettront de faire des estimations assez précises sur la qualité de la terre que l'on compte employer en construction.



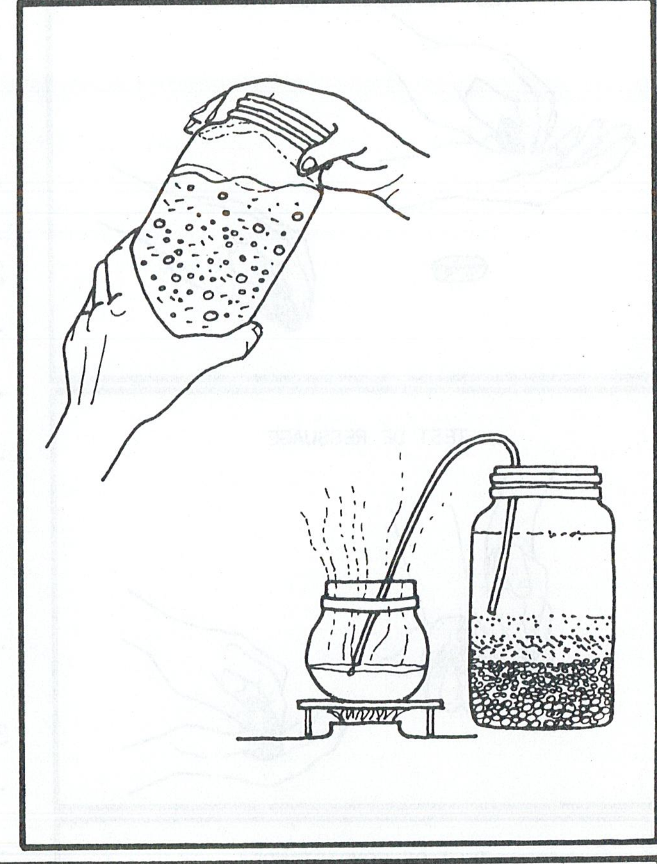
Lorsque les analyses préliminaires de terrain ne donnent pas de résultats assez satisfaisants, il convient d'engager une autre série d'essais principalement basés sur l'observation de la texture, de la plasticité et de la cohésion. Ces essais n'exigent aucun matériel sophistiqué, tout au plus quelques récipients, un tube flexible, une cuiller. Cette seconde série d'essais permettra de dresser une clas-

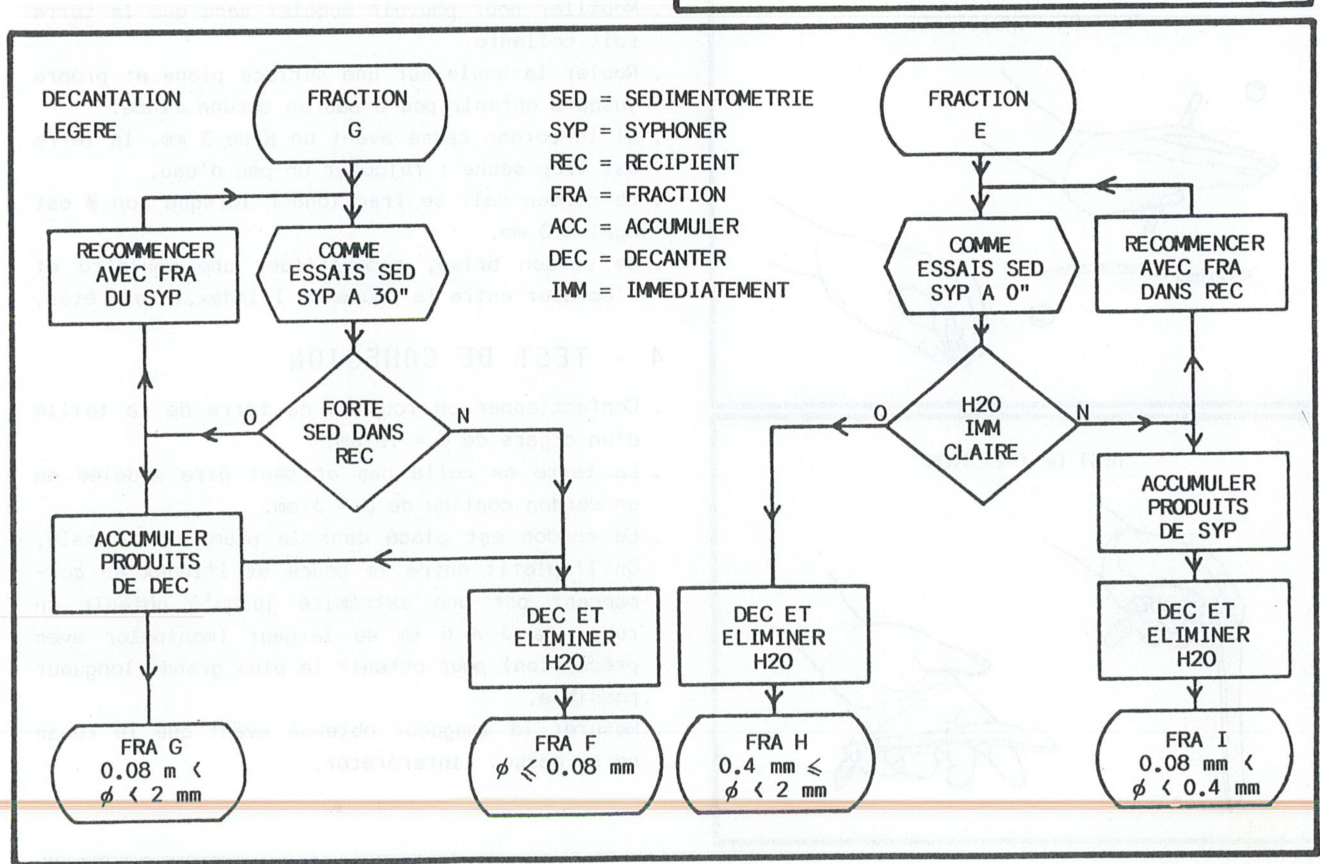


sification géotechnique de terrain.

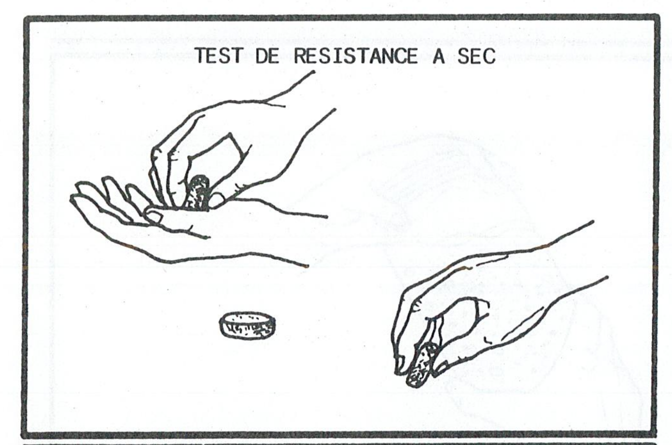
DECANTATION

La procédure de l'essai de décantation commence de la même façon que pour l'essai de sédimentation : on agite vigoureusement le flacon contenant l'échantillon de terre et l'eau, puis on laisse décanter. L'eau et les matériaux en suspension sont prélevés à l'aide d'un tube flexible de ϕ intérieur de 0,50 cm minimum qui permet de siphonner et le tout est déposé dans un récipient. Cette opération peut être répétée plusieurs fois. L'excès d'eau que peuvent encore contenir les différentes fractions de grains est évacué par évaporation. La décantation n'est pas une méthode de séparation très précise, mais elle est plus efficace qu'une simple évaluation usuelle des deux fractions.



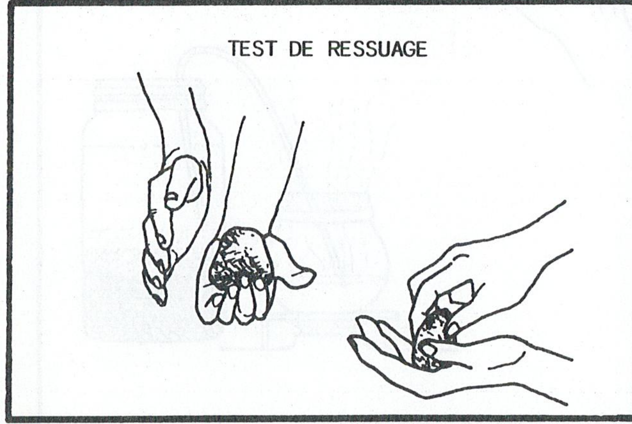


Les analyses suivantes sont réalisées sur la fraction "mortier fin" (ϕ < 0,4 mm) isolée par tamisage ou par le test de décantation à partir de la fraction de grains de ϕ < 2 mm.



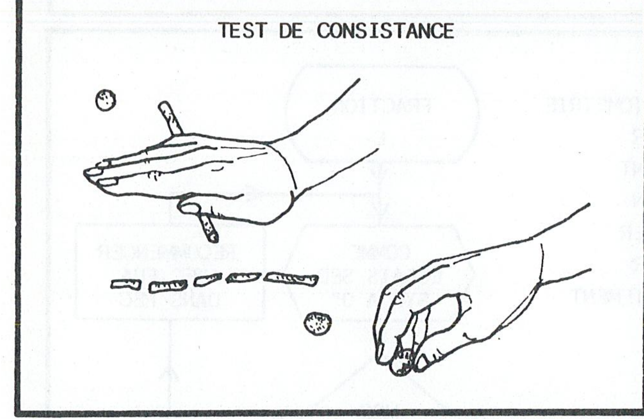
1 - TEST DE RESISTANCE A SEC

. Préparer deux ou trois pastilles de terre molle.
. Faire sécher les pastilles au soleil ou au four jusqu'à ce qu'elles soient totalement sèches.
. Casser la pastille de terre et essayer de la réduire en poudre entre le pouce et l'index.
. Evaluer la résistance de la pastille, interpréter.



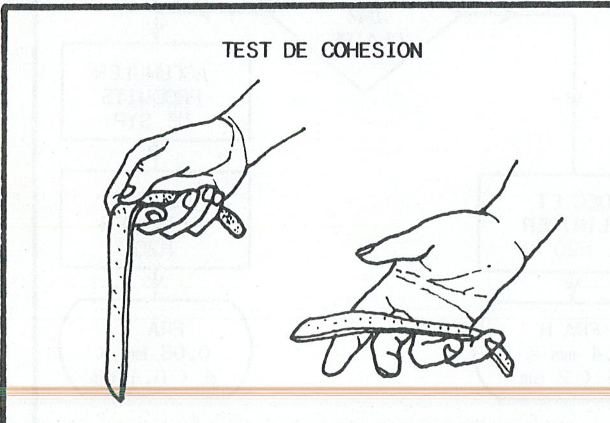
2 - TEST DE RESSUAGE

. Confectionner une boule de "mortier fin" de 2 ou 3 cm de ϕ.
. Mouiller la boule de façon à ce qu'elle se tienne sans coller aux doigts.
. Légèrement aplatir la boule dans la paume de la main en extension horizontale et du tranchant de l'autre main, frapper vigoureusement la paume portant la boule aplatie pour en faire sortir l'eau. L'aspect de la terre peut être lisse, brillant ou gras.
. Presser ensuite la boule plate entre le pouce et l'index et observer les réactions, interpréter.



3 - TEST DE CONSISTANCE

. Confectionner une boule de "mortier fin" de 2 à 3 cm de ϕ.
. Mouiller pour pouvoir modeler sans que la terre soit collante.
. Rouler la boule sur une surface plane et propre jusqu'à obtenir peu à peu un cordon mince.
. Si le cordon casse avant un ϕ de 3 mm, la terre est trop sèche : rajouter un peu d'eau.
. Le cordon doit se fractionner lorsque son ϕ est égal à 3 mm.
. Le cordon brisé, reconstituer une boulette et l'écraser entre le pouce et l'index, interpréter.



4 - TEST DE COHESION

. Confectionner un rouleau de terre de la taille d'un cigare de ϕ = 12 mm.
. La terre ne colle pas et peut être modelée en un cordon continu de ϕ = 3 mm.
. Le cordon est placé dans la paume de la main. On l'aplatit entre le pouce et l'index en commençant par une extrémité jusqu'à obtenir un ruban de 3 à 6 mm de largeur (manipuler avec précaution) pour obtenir la plus grande longueur possible.
. Mesurer la longueur obtenue avant que le ruban ne se casse, interpréter.

OBSERVATIONS	INTERPRETATIONS
GRANDE RESISTANCE A SEC	. La pastille sèche est très difficile à casser, elle se brise avec un claquement, tel un biscuit sec. On ne peut écraser la terre entre le pouce et l'index, seulement l'effriter sans la réduire en poudre : ARGILE PRESQUE PURE.
RESISTANCE MOYENNE A SEC	. La pastille n'est pas trop difficile à casser. On arrive à la réduire en poudre entre le pouce et l'index après quelques efforts : ARGILE LIMONEUSE OU SABLEUSE.
FAIBLE RESISTANCE A SEC	. La pastille se casse facilement et se réduit en poudre entre le pouce et l'index sans aucune difficulté : LIMON OU SABLE FIN, PEU D'ARGILE.
REACTION RAPIDE	. 5 à 6 coups suffisent pour faire venir l'eau à la surface. . En pressant, l'eau disparaît puis la boule s'effrite : SABLES TRES FINS OU LIMONS GROSSIERS.
REACTION LENTE	. 20 à 30 coups sont nécessaires pour que l'eau vienne à la surface. . En pressant, la boule ne se craquèle pas ni ne s'effrite; elle s'aplatit: LIMON LEGEREMENT PLASTIQUE OU ARGILE LIMONEUSE.
REACTION TRES LENTE OU NULLE	. Aucune réaction de ressuage en surface. . En pressant, la boule demeure brillante : TERRE ARGILEUSE.
CORDON DUR	. La boulette reconstituée s'écrase difficilement, ne se fissure pas ni ne s'émiette : BEAUCOUP D'ARGILE.
CORDON MI-DUR	. La boulette reconstituée se fissure et s'émiette: PEU D'ARGILE.
CORDON FRAGILE	. Il est impossible de reconstituer une boulette sans qu'elle ne se casse ni ne s'émiette : BEAUCOUP DE SABLE ET DE LIMON, TRES PEU D'ARGILE.
CORDON MOU OU SPONGIEUX	. Les cordons et les boulettes reconstitués sont mous et spongieux : TERRE ORGANIQUE.
LONG RUBAN : 25 à 30 cm	. BEAUCOUP D'ARGILE.
RUBAN COURT 5 à 10 cm obtenus difficilement	. FAIBLE TENEUR EN ARGILE.
PAS DE RUBAN	. TRES FAIBLE TENEUR EN ARGILE.

TAMISAGE

Il consiste à filtrer la terre à travers une série de tamis normalisés superposés par ordre décroissant (le plus fin en dessous) et à déterminer les fractions de grains retenues par chaque tamis.

1 - MODE OPERATOIRE

L'analyse par tamisage s'effectue sur la fraction de grains de diamètre supérieur à 0,08 mm. La quantité de terre utile est d'environ 800 g, moins pour les terres fines (100 à 200 g) et plus pour les terres grenues (jusqu'à 2 à 3 kg). Le matériel nécessaire rassemble une série de tamis (trous carrés) ou de passoires (trous ronds) normalisés, 2 bacs contenant les tamis, une pissette souple de 500 ml, une balance de 2 à 5 kg ayant une précision minimale de 0,1 g, un réchaud à gaz, des pinceaux, 1 poêle et des plateaux, une spatule, des gants d'amiante, une étuve (accessoire). L'échantillon tamisé est séché jusqu'à son poids constant; ce poids sec est noté. Le tamisage s'effectue tamis par tamis, sous l'eau. Le rinçage permet de laver les éléments et de dissocier les fines des sables et graves. Les fines de rinçage sont chaque fois récupérées dans un bac et renversées dans un deuxième bac qui contient le tamis suivant et ainsi de suite jusqu'à épuisement des tamis. Chaque refus de tamisage est séché et pesé; le poids sec de chaque refus est noté. Pour le tamisage des éléments fins (à partir de 0,4 mm), on remue les éléments avec un pinceau. Pour chaque tamis, la pissette souple permet de pratiquer un rinçage soigné des refus.



2 - CRITIQUE

Bien qu'il existe un grand nombre de modes opératoires, l'analyse par tamisage est une procédure assez fiable car les résultats demeurent assez similaires pour les différents modes opératoires. La modulation des tamis ou des passoires est aussi assez large mais l'on observe une tendance vers l'abandon des passoires au profit des tamis. De même, les diagrammes granulométriques varient, ce qui peut gêner la comparaison des résultats. Actuellement, on peut utiliser tous les types de diagrammes classiques sans risque de mauvaise interprétation. Un inconvénient réside dans le fait que les fractions de grains sont exprimées en poids alors que la texture est plutôt évoquée en volume occupé. En effet, les poids spécifiques des fractions fines sableuses et argileuses sont très différents mais des critères d'interprétation ont été élaborés en conséquence. Le séchage sur réchaud peut provoquer des modifications minérales si la température monte trop haut. Le séchage en étuve prend beaucoup de temps. Afin d'éviter ces inconvénients, une méthode a été mise au point qui élimine cette nécessité de séchage en pesant la fraction humide d'après le principe d'Archimède

3 - ANALYSE SIMPLIFIEE

Il existe une méthode simplifiée de tamisage, par siphonage : décantation pendant 20 minutes, dans une éprouvette graduée de 20 cm, d'une fraction de terre passée au tamis de 2 mm ou de 5 mm; séparation du matériau en suspension par siphonage, dessiccation et pesée, et du matériau déposé qui est tamisé et pesé après séchage de chaque refus.

4 - COEFFICIENTS

Un diamètre particulier de grain est exprimé par la lettre "D" accompagnée d'un chiffre qui exprime le pourcentage passant p.e., pour un D50 = 2 mm : 50 % en poids de la terre est composée de grains d'un ⌀ 2 mm. Pour déterminer si la granulométrie de la terre est bonne, des coefficients ont été définis qui donnent une indication sur la forme et la pente de la courbe granulométrique :

coef. d'uniformité : $Cu = D60/D10$

coef. de courbure : $Cc = (D30)^2/(D10 \times D60)$.

SEDIMENTOMETRIE

L'analyse granulométrique que l'on obtient par tamisage est incomplète. Si elle suffit pour la plupart des applications dans le domaine des travaux routiers, elle est insuffisante pour la construction en terre qui exige une analyse de la texture des fines avec un ø 0,08 mm. Cette analyse se fait par la sédimentométrie qui utilise la différence de vitesse de chute des particules d'une terre en suspension dans l'eau. Les particules les plus grosses se déposent en premier et les plus fines en dernier. On mesure régulièrement, dans le temps et à une hauteur donnée (diminution de la densité avec l'éclaircissement du liquide), la variation de la densité. La connaissance de la vitesse de chute des particules selon leur taille permet de calculer les proportions par les différentes grosseurs de grains.

1 - MODE OPERATOIRE

L'appareillage nécessaire à une analyse sédimentométrique réunit 2 éprouvettes graduées de 1000 ml, de ø 5,5 cm, 1 densimètre gradué de 995 à 1050, un thermomètre et une montre. La fraction de terre de ø à 0,08 mm qui doit être analysée est préparée: sur les fines qui ont été étuvées après tamisage, 20 g sont prélevés et mélangés avec 20 cm^3 de défloculant. Il est indispensable de vérifier, après défloculation, si la solution n'est pas acide ($pH > 9,5$) car les argiles risquent de floculer. La solution est remuée avec un agitateur pendant 3 min et laissée au repos pendant 18 h. Les mesures commencent après ce délai. On agite à nouveau la solution de la 1ère éprouvette pendant 3 min puis l'on y plonge le densimètre, doucement, après 45 secondes. On prend avec un chronomètre les mesures à 1 min et 2 min, sans sortir le densimètre. Les autres mesures sont prises à 5 min, 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 5 h et 24 h. On plonge le densimètre environ 15 sec avant de faire la lecture et on le retire aussitôt pour le plonger dans l'éprouvette-témoin. Il est très important de vérifier à chaque mesure l'égalité de température des 2 éprouvettes car une différence peut influencer sur la qualité de l'analyse. On ne poursuit pas l'analyse au-delà de 0,001 mm car pour cette taille de grains, des phénomènes de turbulence et de défloculation perturbent la sédimentométrie.

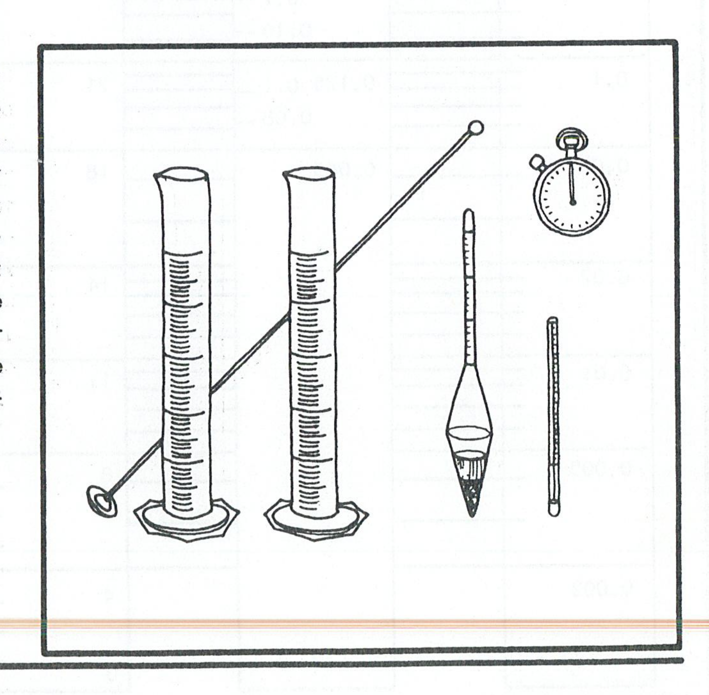
2 - CRITIQUE

L'analyse sédimentométrique ne prend que peu de temps pour chaque mesure mais dure près de 48 h. Quelques problèmes peuvent se poser pour les premières mesures, lorsque l'on consigne les résultats sur le diagramme granulométrique, la courbe de sédimentométrie s'accordant mal avec celle de tamisage. Il est dans ce cas nécessaire de recommencer la procédure d'analyse sédimentométrique.

3 - DEFLOCULANT

L'ajout d'un défloculant à la solution de fines en suspension qui doit être analysée par sédimentométrie est impératif. Il existe plusieurs produits mais l'un des plus employés en laboratoire est l'hexamétaphosphate de sodium à raison de 20 g pour 1 l d'eau. La solution doit être bien mélangée et immédiatement utilisée. On peut employer des produits de remplacement mais il est alors impératif de procéder à un étalonnage en prenant référence sur le mode opératoire qui emploie l'hexamétaphosphate de sodium. Les autres défloculants de remplacement, employés à raison de 1 g/ cm^3 d'eau distillée sont :

- la gomme arabique;
- le bicarbonate de soude;
- le silicate de sodium (produit de lavage de vitres);
- des bases ou des sels basiques tels que: lessive de soude, ammoniaque, silicates de soude en solution ou carbonates de soude en solution.



CORRESPONDANCE DES NORMES D'IDENTIFICATION DE TAMIS

TAMIS EUROPEENS (TROUS CARRES) A.F.N.O.R. XII-501 (mm)	PASSOIRES EUROPEENNES (TROUS RONDS) A.F.N.O.R. XII-501 (mm)	MODULE PRATIQUE A.F.N.O.R. XII-501 (N°)	TAMIS BRITANNIQUES B.S. 410 (N°)	TAMIS AMERICAINS A.S.T.M. E 11/26 (N°)
20	25 — 20.0, 16.0	44	3/4", 1/2"	3/4", 1/2"
10	12.5 — 10.0, 8.0	41	3/8"	3/8"
5	6.3 — 5.0, 4.0, 3.15	38	5 — 6, 7	4, 5 — 6, 7, 8
2	2.5 — 2.0, 1.6	34	8, 10 — 12, 14, 16	10 — 12, 14, 16
1	1.25 — 1.0, 0.8	31	18, 20 — 22, 25	18, 20 — 30
0.5	0.63 — 0.5, 0.4, 0.315	28	30, 36, 44, 52, 50 — 60	40, 50 — 60
0.2	0.25 — 0.2, 0.16	24	70, 85, 100 — 120, 150	70, 80, 100 — 120, 140
0.1	0.125 — 0.1, 0.08	21	170, 200 — 240	170, 200 — 250, 270
0.05	0.063	18	300	325
0.02		14		
0.01		11		
0.005		8		
0.002		4		
		0		

DIAGRAMME DE GRANULARITE

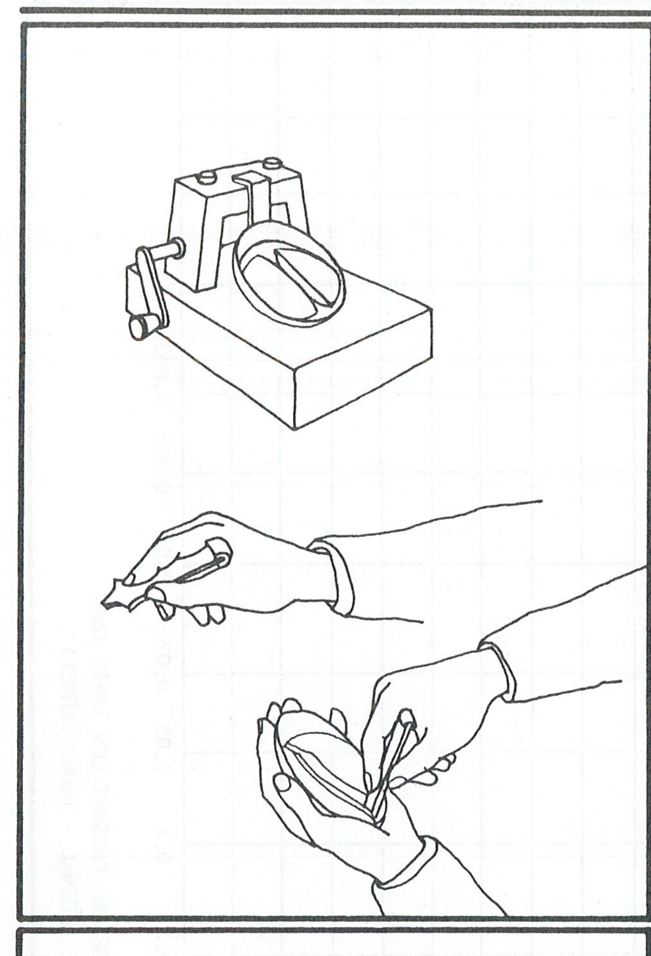
CAILLOUX	GRAVIERS	SABLES GROSSIERS	SABLES FINS	SILTS	ARGILES

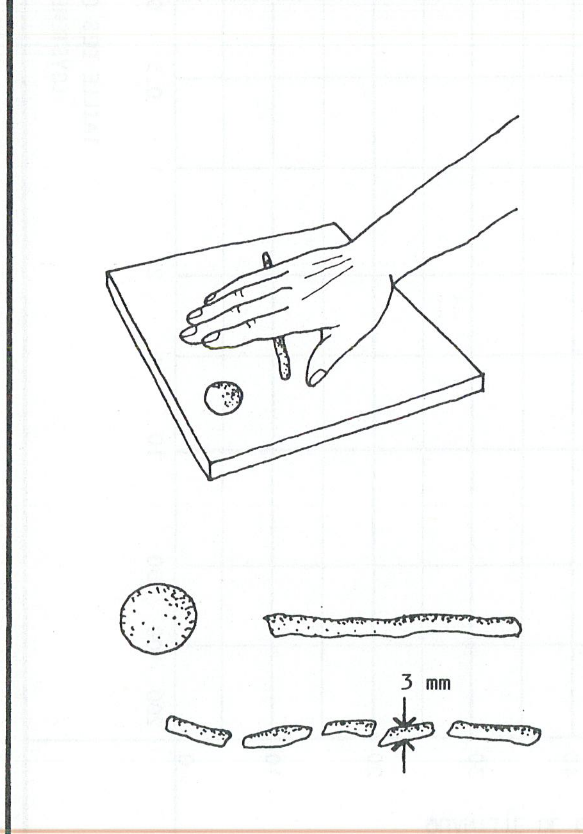
QUANTITE DE GRAINS PASSANT LES TAMIS (%)

90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

200 100 50 10 5 2 1 0.5 0.2 0.1 0.05 0.02 0.01 0.005 0.002

TAILLE DES GRAINS PASSANT LES TAMIS (mm)
(SYSTEME DECIMAL - TROUS CARRES)





Une terre peut avoir différents états de consistance. Elle peut être liquide, plastique ou solide p.e. Le chercheur suédois Atterberg a défini ces différents états hydriques et les frontières qui les séparent par des limites et des indices exprimés en % pondéral de teneur en eau. On peut mesurer 5 limites :

- la limite de liquidité;
- la limite de plasticité;
- la limite de retrait;
- la limite d'absorption;
- la limite d'adhérence.

Les 2 premières limites sont les principales et les 3 autres, quoique intéressantes, sont peu utilisées. La détermination des limites d'Atterberg est pratiquée sur la fraction "mortier fin" de la terre qui passe à travers le tamis de 0,4 mm car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance.

1 - MODE OPERATOIRE

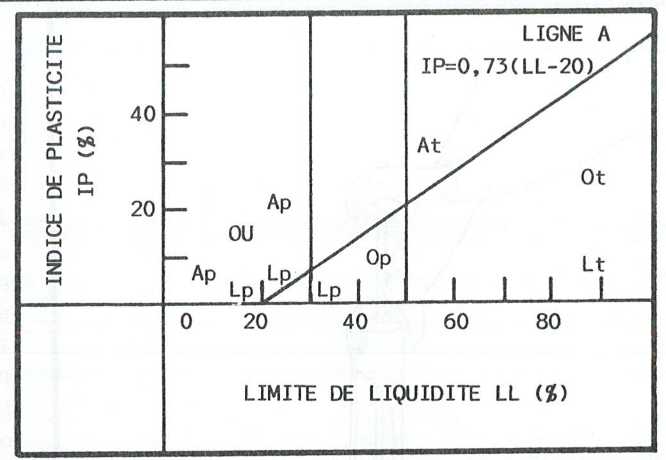
- **LIMITE DE LIQUIDITE (Ll) :** c'est le passage de l'état plastique à l'état liquide. Ll se mesure avec un appareil de Casagrande. 50 à 70 g de mortier fin préparé à l'avance sont étalés dans la coupelle (épaisseur max = 1 cm) et divisés en 2 parties par une rainure axiale normalisée(longueur min = 4 cm). Ll est la teneur en eau exprimée en % pondéral du poids du matériau sec étuvé à 105°C pour laquelle le sillon se referme sur 1 cm sous l'influence de 25 coups produits par la chute de la coupelle d'une hauteur de 1 cm sur une surface dure. L'essai est pratiqué pour différentes teneurs en eau et l'on trace la courbe d'évolution (une droite) du nombre de coups (entre 15 et 30) et des teneurs en eau.
- **LIMITE DE PLASTICITE (Lp) :** c'est le passage de l'état plastique à l'état solide avec retrait. Lp est la teneur en eau exprimée en % pondéral du poids du matériau sec étuvé à 105°C pour laquelle un petit rouleau de mortier fin se brise en tronçons de 1 à 2 cm de long lorsque le diamètre du rouleau atteint 3 mm. Le rouleau doit être long de 5 à 6 cm.
- **L'INDICE DE PLASTICITE (Ip) :** il caractérise la plasticité de la terre. Ip = Ll - Lp. Plus Ip est important, plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants. Ip précise donc les risques de déformation du matériau.

2 - CRITIQUE

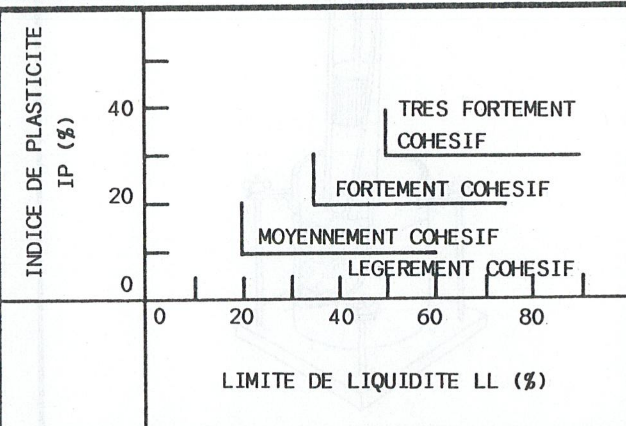
Les résultats des limites d'Atterberg sont tributaires d'un respect scrupuleux des modes opératoires et du "coup de main" de l'opérateur. On reproche à ces mesures leur caractère empirique mais ces essais rendent d'immenses services.

3 - PARAMETRES EN INTERRELATION

Dans l'analyse de la plasticité d'une terre, les 2 paramètres les plus importants sont la texture et la nature minéralogique des argiles. En effet, c'est tout autant la quantité que la qualité de la fraction argileuse qui influencent la plasticité d'une terre et donc les limites d'Atterberg. Les diagrammes des limites d'Atterberg décrivent des zones qui qualifient les terres qui s'y inscrivent. Du fait qu'il existe une interrelation mathématique entre Ll, Lp et Ip, il suffit de préciser le diagramme de 2 de ces paramètres avec Ip que l'on note en ordonnée et Ll que l'on note en abscisse.



1 - COHESION : elle dépend de la teneur en eau et elle est très grande lorsque les grains sont fins. La cohésion est grande pour une teneur en eau $<$ Lp : état presque solide où l'eau devient un liant dont la viscosité influe sur la cohésion. A la Lp, la quantité d'eau est telle qu'elle possède les propriétés de l'eau libre. Avec l'augmentation de la teneur en eau, la cohésion apparente (pression capillaire, frottements de surface) diminue puis s'annule. A la Ll, la cohésion vraie elle-même s'annule. Ainsi, Ip = Ll - Lp précise la cohésion d'une terre; mais, des essais comparatifs ont montré que la partie de Ip $>$ 1/4 de Ll représente la quantité d'eau nécessaire pour vaincre la cohésion vraie existante, précisant ainsi le degré de cohésion vraie de la surface des particules qui dépend aussi de la nature minéralogique des argiles.

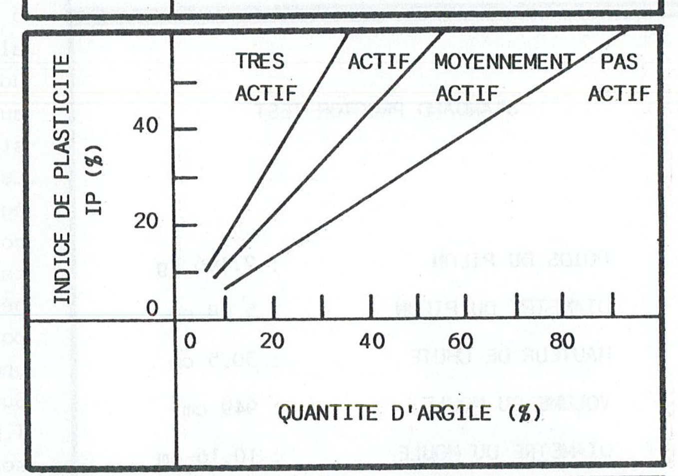


2 - COEFFICIENT D'ACTIVITE :

$$Ca = \frac{Ip}{\%\ d'argiles\ de\ \phi < 2\ \mu}$$

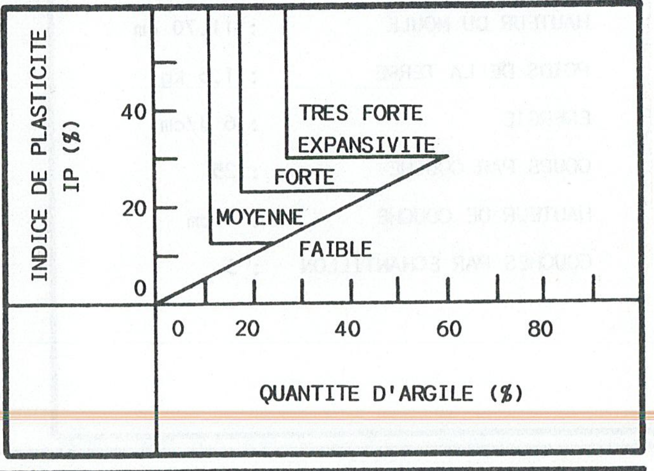
Ce coefficient précise l'activité des argiles. Si l'on met en rapport cette activité des argiles avec leur quantité, on caractérise l'expansivité du mortier. On peut obtenir des résultats contradictoires : forte activité des argiles et faible expansivité du mortier si celui-ci en contient en faible proportion. Ca 0,75 : inactifs (I).

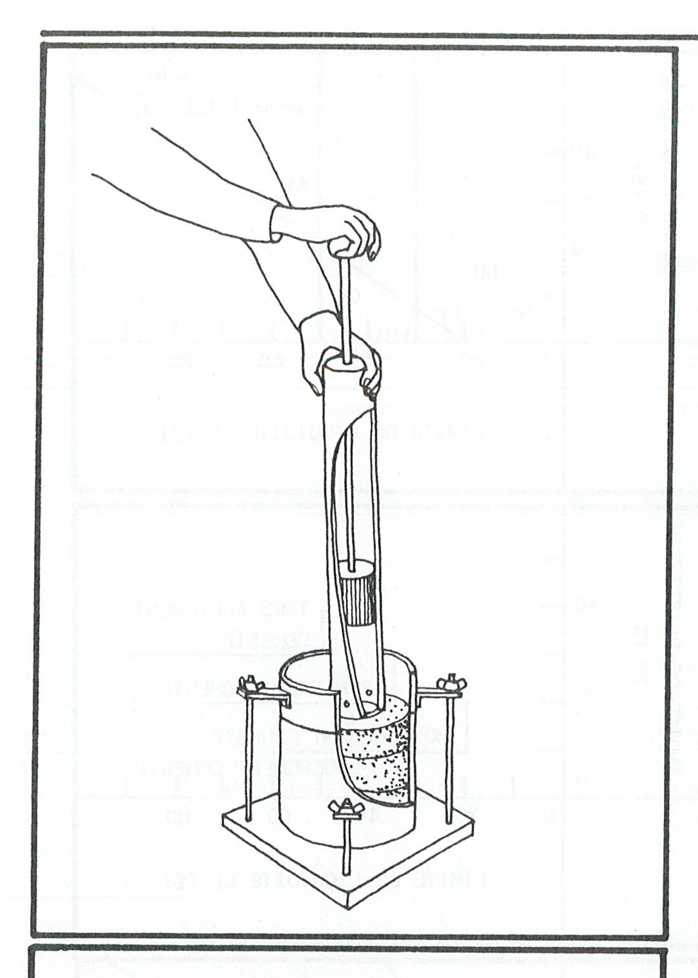
- Ca $<$ 0,75 : inactif (I);
- 0,75 $<$ Ca $<$ 1,25 : activité moyenne (AM);
- 1,25 $<$ Ca $<$ 2 : actif (A);
- Ca $>$ 2 : très actif (TA).



3 - AUTRES INTERRELATIONS : les limites d'Atterberg sont également plus ou moins en interrelation avec d'autres paramètres tels que :

- densité maximale sèche;
- teneur en eau optimale;
- retrait linéaire;
- résistance à la compression.





STANDARD PROCTOR TEST

POIDS DU PILON	: 2.496 kg
DIAMETRE DU PILON	: 5.08 cm
HAUTEUR DE CHUTE	: 30.5 cm
VOLUME DU MOULE	: 949 cm³
DIAMETRE DU MOULE	: 10.16 cm
HAUTEUR DU MOULE	: 11.70 cm
POIDS DE LA TERRE	: 1.5 kg
ENERGIE	: 6 J/cm³
COUPS PAR COUCHE	: 25
HAUTEUR DE COUCHE	: 4 cm
COUCHES PAR ECHANTILLON	: 3

Pour que le compactage d'une terre soit efficace, il doit être réalisé sur un matériau dont la teneur en eau assure une bonne lubrification des grains leur permettant ainsi de se réarranger entre eux pour occuper le moins de place possible. En effet, si la teneur en eau est trop élevée, la terre risque de gonfler et la pression de l'engin de compactage est amortie par l'eau qui ne peut être chassée d'entre les grains. A l'opposé, si la teneur en eau est trop faible, la lubrification des grains est insuffisante et la terre ne pourra pas être compactée à son volume minimal. La teneur en eau optimale (T.E.O) à laquelle on obtient une densité sèche maximale, est déterminée par l'essai Proctor (du nom de l'entrepreneur américain qui l'a mis au point). Les résultats sont consignés sur un diagramme qui note en ordonnée la densité sèche, γd, exprimée en kg/m³ et en abscisse la teneur en eau, L, exprimée en % pondéral. Les 3 variables principales intervenant sur l'obtention de la densité sèche maximale sont : la texture, l'état hydrique et l'énergie de compactage.

1 - MODE OPERATOIRE

L'essai Proctor est réalisé en principe sur la fraction de terre qui passe au travers du tamis 5 mm mais on peut tolérer des grains de taille allant jusqu'à 25 mm. Un échantillon de terre dont on connaît la teneur en eau (pesé et comparé au poids sec étuvé à 105°C)est placé dans un moule standard cylindrique (lui-même pesé au préalable). Le compactage se fait en 3 couches d'épaisseur égale et de façon égale sur toute la surface des couches avec un poids normalisé tombant d'une hauteur déterminée 25 fois. Chaque opération terminée, on pèse le moule et l'échantillon et l'on porte les résultats sur un diagramme Proctor en une courbe passant par les points expérimentaux. Sur cette courbe, on peut lire la γ d max et le T.E.O. Les essais Proctor les plus classiques sont le Proctor AASHO standard et le Proctor AASHO modifié.

2 - CRITIQUE

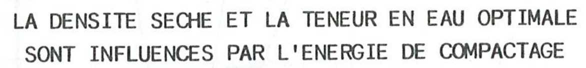
Cet essai n'est applicable qu'aux terres destinées à être mises en oeuvre par densification dynamique pisé ou blocs comprimés à l'aide d'un pilon. Théoriquement, il n'est pas applicable aux blocs comprimés par pression statique ou dynamique par vibration ou martelage, mais de très bonnes correspondances ont été établies, rendant son utilisation tout à fait fiable. L'essai n'est pas valable pour des techniques telles que adobe, bauge, etc...

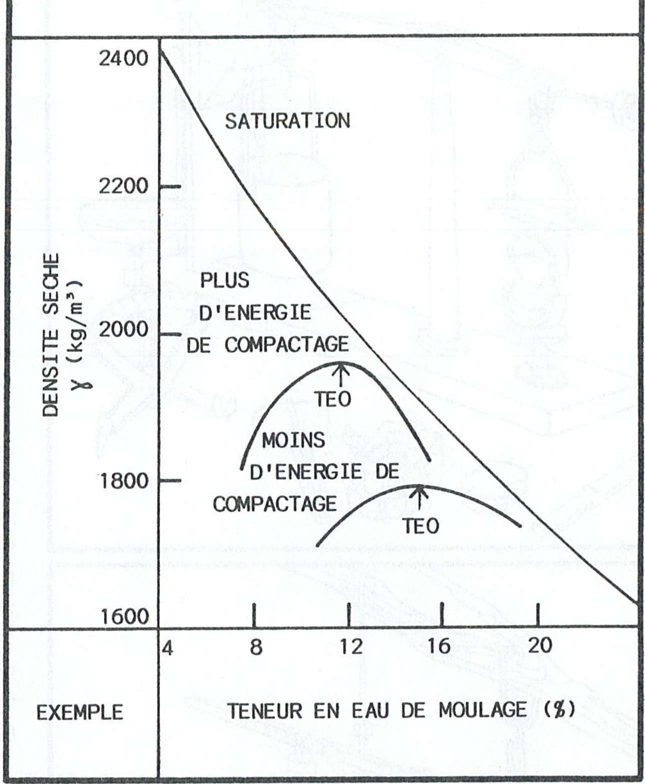
3 - INFLUENCES

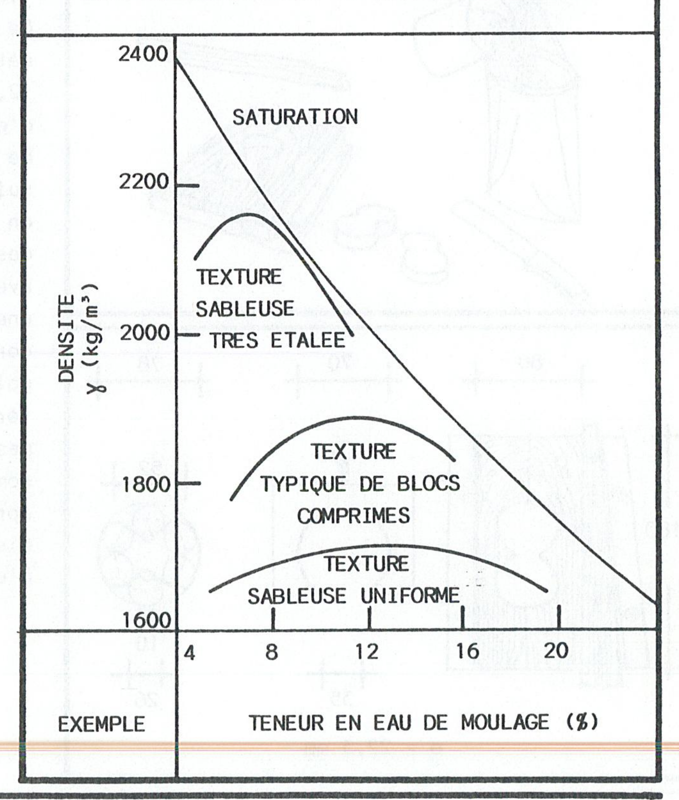
1 - ENERGIE DE COMPACTAGE : une énergie de compactage croissante entraîne une augmentation de la densité sèche et une diminution de la T.E.O. En général, pour un compactage croissant, le sommet de la courbe Proctor est accentué alors qu'il s'aplatit pour un compactage moins énergique. Au-dessus de la T.E.O., pour un volume d'air insignifiant, un compactage croissant n'a que peu d'effet sur la densité sèche (γs) alors qu'en-dessous de la T.E.O., pour un volume d'air important, l'effet d'un compactage croissant est manifeste. On ne parvient jamais à éliminer le volume d'air en totalité et donc d'atteindre le maximum théorique de la densité sèche (souvent fixée à 2 650 kg/m³).

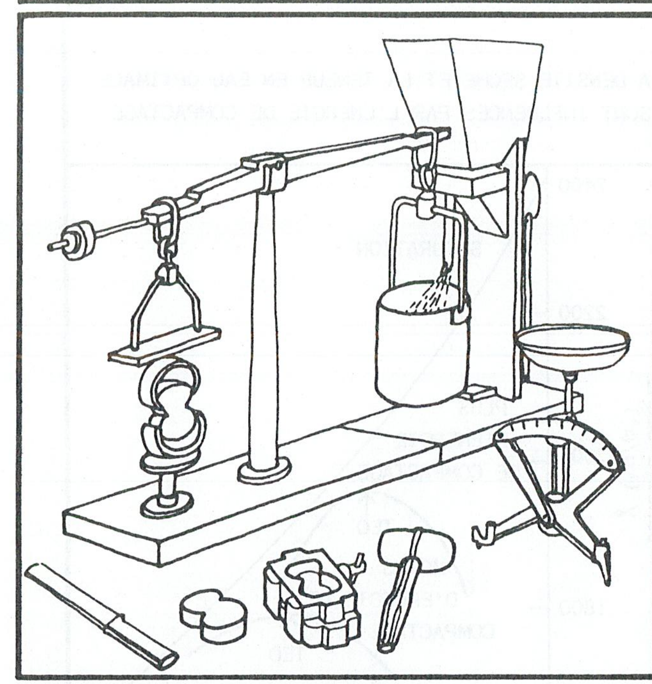
2 - TENEUR EN EAU : pour de faibles teneurs en eau, le sol est difficile à comprimer : on obtient des γd basses et des volumes d'air(Va) importants. Avec une augmentation de la teneur en eau, le sol est lubrifié et plus ouvrable : les γd sont plus importantes et les Va plus réduits; γd max. est obtenu pour la T.E.O. Si la teneur en eau augmente encore, Va décroît mais la combinaison de l'eau et de l'air s'oppose à une réduction appréciable du volume d'air. Le volume total d'eau et d'air croît et γd diminue.

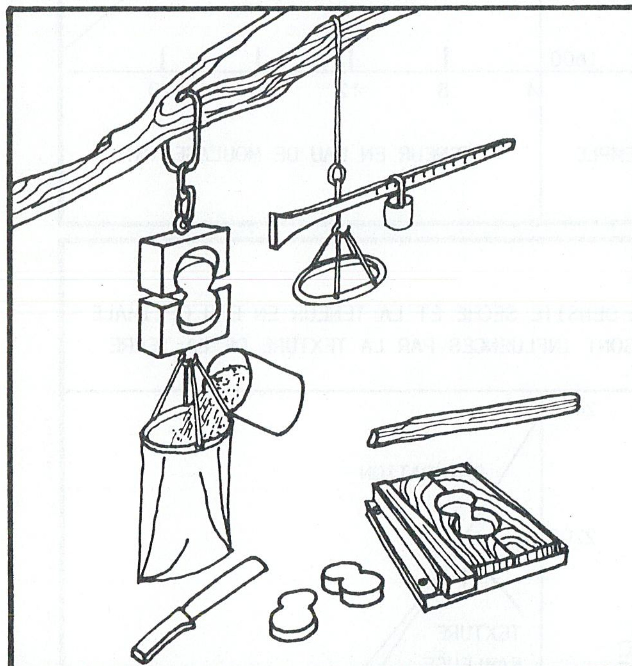
3 - TEXTURE : la γd max. dépend du type de terre et de ses caractéristiques principales dont :
- la dimension moyenne des grains pour un passant de 50 % (D50) dans la courbe granulométrique.
. Les terres argileuses : γd max. = 2 000 kg/m³.
. Les terres sableuses : γd max. = 2 200 kg/m³.
. Les terres graveleuses : γd max. = 2 500 kg/m³.
En moyenne, la γd max. d'une terre comprimée varie de 1 700 à 2 300 kg/m³.
- l'étendue granulométrique : pour une texture uniforme, la porosité est élevée et la sensibilité à la teneur en eau réduite. La courbe Proctor est aplatie. Pour une texture étalée, la courbe Proctor est plus pointue.
- le % de grains avec un ⌀ < 0,08 mm accentue les variations de γd suivant la teneur en eau: courbes plus pointues.

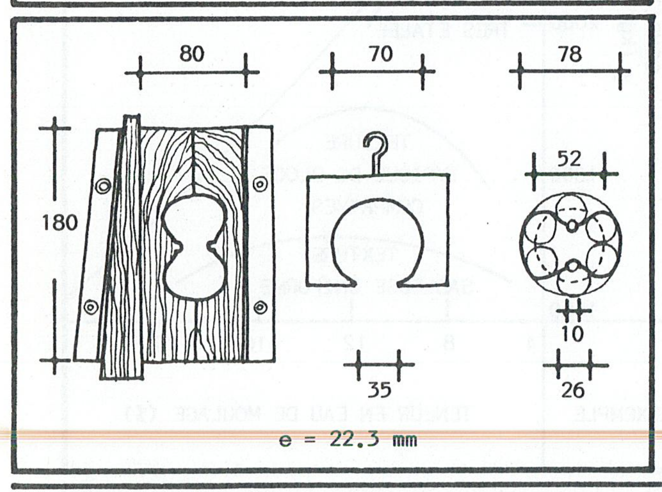












L'essai de cohésion que l'on appelle aussi essai à la traction humide ou encore essai du 8 (à cause de la forme de l'échantillon testé) a été mis au point par l'allemand Niemeyer. Il fut publié pour la première fois en 1944 puis adopté en 1947 par Wagner pour être enfin intégré aux normes Din en 1956.

La terre est constituée de 2 fractions de grains principales : les inertes (ø > 2 mm) et le mortier grossier (ø < 2 mm). Si l'on observe le mortier grossier afin d'évaluer la cohésion des grains entre eux, il faut faire un essai de résistance à la traction. Pour raccourcir la durée de cet essai, on le réalise sur un échantillon humide gagnant ainsi le délai du séchage. Cet essai peut se faire en laboratoire ou sur le terrain. En laboratoire, sur un appareil à balancier et pesage automatique, ou sur un appareil à potence avec débit et arrêt de charge automatique, ou sur un appareil sophistiqué, entièrement automatique avec enregistrement. Sur le terrain, avec quelques planches et clous, ficelles et récipients en suspendant l'échantillon à une branche d'arbre, une table ou un encadrement de porte, etc... Le sable de charge peut être remplacé par un liquide, eau ou huile de vidange p.e. Il faut réduire au maximum la distance de chute de la charge.

1 - MODE OPERATOIRE

La fraction de grains de ø > 2 mm est éliminée par tamisage. L'essai est donc pratiqué sur la fraction mortier grossier qui est séchée et broyée. Ce broyage de la terre s'effectue sur une plaque métallique (60 x 60 cm), à l'aide d'un marteau (2,5 x 2,5 cm) en ajoutant régulièrement très peu d'eau, jusqu'à obtenir une galette compacte et de consistance plastique. Cette galette est ensuite soulevée à l'aide d'un couteau et découpée en larges lanières qui sont posées les unes à côté des autres verticalement, puis de nouveau écrasées avec le marteau. La terre est ainsi retravaillée, une nouvelle galette de nouveau découpée puis encore écrasée, jusqu'à ce que la structure de la galette soit tout à fait homogène sur sa face inférieure et d'humidité égale en tout point de sa masse. Les terres parfaitement sèches avant de commencer la préparation doivent reposer 12 à 24 h après la préparation pour permettre la meilleure dispersion de l'eau et donc favoriser l'obtention d'une cohésion maximale des grains.

200 g de la terre préparée sont prélevés. La densité de cette terre est élevée par pétrissage et en la tapant plusieurs fois sur une plaque métallique. On forme ensuite une boule de ϕ = 50 mm. Il faut éviter une manipulation prolongée pour ne pas faire varier la consistance de la boule en différents points de sa masse. Pour les terres maigres, le ϕ de la boule est réduit de ½ à 1 mm. Pour les terres grasses, le ϕ est augmenté de ½ à 1 mm. Le diamètre est vérifié à l'aide d'un anneau. Ensuite, on laisse choir la boule d'une hauteur de 2 m sur une surface lisse et dure. La bonne consistance est obtenue si la partie aplatie de la boule est égale à 50 mm. Pour un ϕ supérieur ou inférieur, il faut recommencer la préparation : laisser sécher pour un ϕ 50 mm (terre trop plastique) ou ajouter un peu d'eau avec un pulvérisateur si le ϕ 50 mm (terre trop sèche).
Ensuite on prépare l'échantillon : dans un moule en forme de 8, légèrement huilé, la terre préparée est damée fortement, en 3 fractions, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'augmentation de la densité. On égalise ensuite les 2 côtés de l'échantillon avec un couteau, sans humidifier. L'échantillon est aussitôt démoulé en laissant tomber le moule sur une surface dure d'une hauteur de 10 cm. On a préparé au moins 3 échantillons.
L'échantillon est fixé sur l'appareil de mesure, suspendu à une griffe en fer ou même en bois dur de ϕ intérieur égal à 70 mm, d'ouverture égale à 35 mm (section égale à 22 mm pour les griffes en fer). Une autre griffe suspend à l'échantillon un récipient qui recevra la charge de rupture : du sable (ϕ 0,2 mm à 1 mm) venant d'un silo;3000 g de sable en 4 minutes, à raison de 12,5 g/seconde ou un maximum de 750 g/min., jusqu'à rupture de l'échantillon. Si la section déchirée contient un corps étranger,la préparation de la terre n'est pas homogène et la mesure n'est pas valable. La mesure de la cohésion est la moyenne de 3 mesures dont les résultats ne sont pas écartés de plus de 10 %. Elle s'exprime en CN/cm² (g/cm²) ou CN/5 cm², la section de l'échantillon étant égale à 5 cm².

QUALIFICATION DE LA COHESION				
COHESION	MORTIER	QUALIFICATION	τ (cN/5 cm²) (g/5 cm²)	τ (cN/cm²) (g/cm²)
A PEINE COHESIF	SABLEUX	TRES MAIGRE	200 - 300	40 - 60
FAIBLEMENT COHESIF	MAIGRE	TRES MAIGRE MAIGRE	300 - 400 400 - 550	60 - 80 80 - 110
MOYENNEMENT COHESIF	MOYEN	PRESQUE MAIGRE PRESQUE GRAS	550 - 750 750 - 1000	110 - 150 150 - 200
FORTEMENT COHESIF	GRAS	GRAS TRES GRAS	1000 - 1350 1350 - 1800	200 - 270 270 - 360
EXTREMEMENT COHESIF	ARGILEUX	MAIGRE GRAS TRES GRAS	1800 - 2400 2400 - 3200 3200 - 4500	360 - 480 480 - 640 640 - 900

ANALYSES MINERALOGIQUES

Après avoir mis en évidence la texture de la terre il importe de connaître la minéralogie de la fraction fine pour situer la stabilité du volume de la terre et sa cohésion. Cette connaissance de la minéralogie est indispensable quand il est prévu de stabiliser la terre (réactions physico-chimiques des minéraux). Parmi les centaines de minéraux inclus dans la fraction fine du matériau, moins d'une dizaine sont très importants et intéressent directement la construction en terre. De simples tests de terrain, à partir d'observations visuelles suivies d'un test d'Emerson permettent des évaluations préliminaires d'un degré de précision raisonnable. Ces tests, peu coûteux et efficaces permettront de sélectionner les échantillons qui requièrent des analyses de laboratoire complémentaires et assureront un grand gain de temps et d'argent dans la procédure d'analyse minéralogique.

RAYONS X ET ATD

Ces analyses très précises sont aussi très coûteuses (≈ 100 US $ par échantillon). Les échantillons analysés sont très réduits (tamisés à 40 μ) et doivent être représentatifs de la terre qui sera employée. Seuls des laboratoires équipés et des spécialistes peuvent réaliser et interpréter ces analyses qui sont surtout qualitatives, rarement quantitatives. Sur les échantillons chauffés, l'analyse par diffraction des rayons X permet de mesurer la position et la hauteur caractéristiques des franges de diffraction selon un balayage à des angles de diffraction correspondants. Pour l'analyse thermique différentielle (ATD), l'échantillon est chauffé de 20 à 900° C. A ces différentes t°, on enregistre des pertes d'eau et les effets qu'elles engendrent, typiques des divers minéraux. Ces analyses sophistiquées et coûteuses doivent être pratiquées exceptionnellement.

OBSERVATIONS SUR L'ENVIRONNEMENT

- Eaux troublées de couleur brun-jaune à brun-rouge : montmorillonites, illites, salinité de la terre.
- Eaux claires: calcium, magnésium, terre riche en fer et très acide, sables.
- Eaux claires à dépôts marbrés, bleutés : kaolins non salins.
- Ravines d'érosion ou galeries naturelles : argiles salines, souvent des montmorillonites.
- Comme ci-dessus mais moins marqué:kaolinites.
- Glissements de terrain:kaolinites, chlorites.
- Microreliefs de surface : montmorillonites.
- Cailloux granitiques : kaolinites, micas.
- Cailloux basaltiques et topographie mal drainée : montmorillonites.
- Comme ci-dessus mais topographie bien drainée : kaolinites.
- Cailloux gréseux : kaolinitiques.
- Cailloux du type Shales : montmorillonites ou illites, parfois salinité de la terre.
- Cailloux calcaires : montmorillonites alcalines et chlorites aux propriétés variables.

ANALYSE DE PROFIL

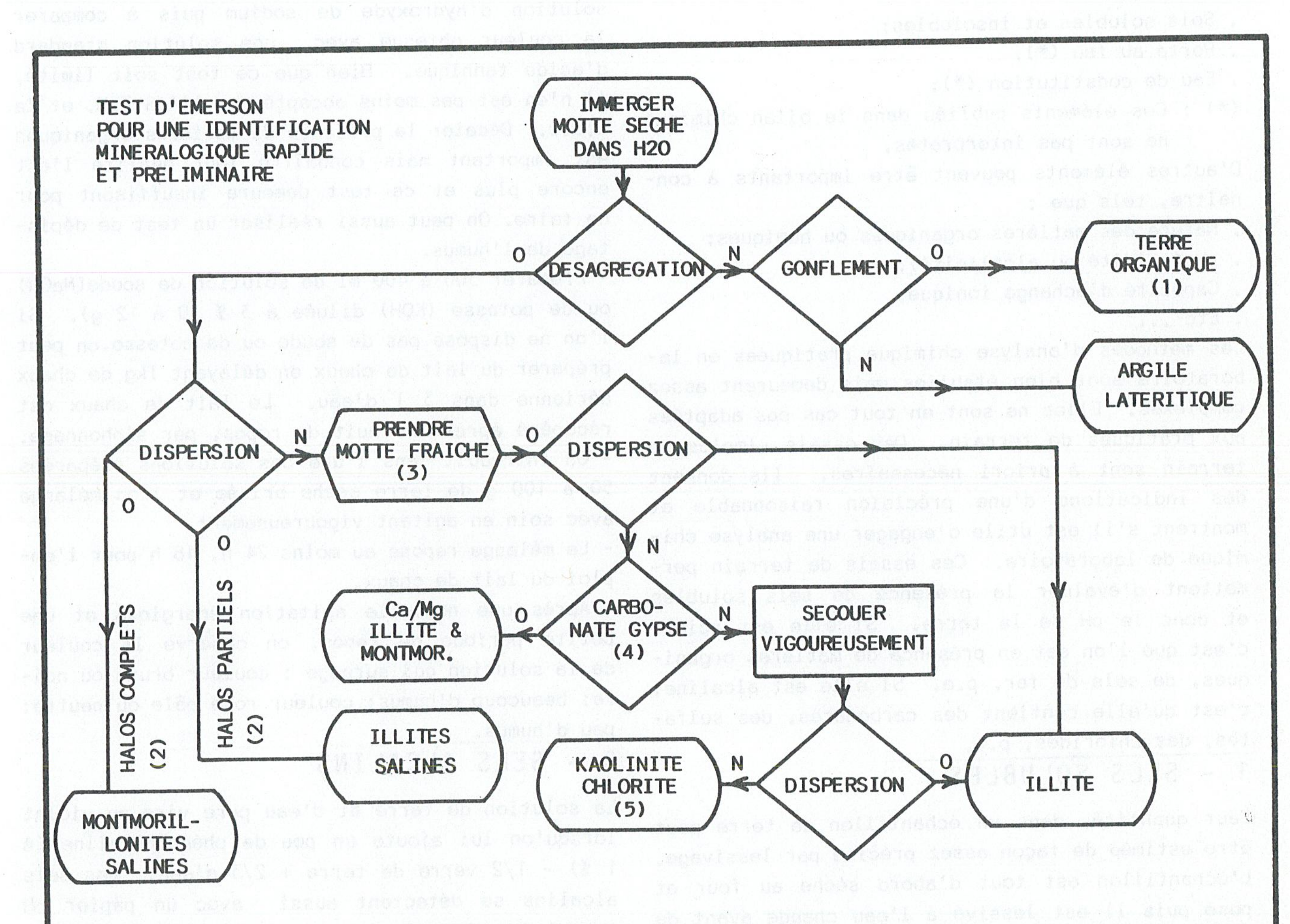
- Argiles marbrées, tachetées de rouge, orange, blanc : kaolinites.
- Argiles marbrées, tachetées de jaune, orange, gris : montmorillonites.
- Argiles de teinte mitigée, grises sombres à noires : montmorillonites.
- Argiles brunes et rouge-brun: illite en quantité appréciable et un peu de montmorillonites.
- Argiles blanches et gris-clair : kaolinites et bauxites.
- Microparticules discrètes très réfléchissantes de la lumière : sols micacés.
- Microcristaux discrets, faciles à broyer : sols riches en gypse.
- Modules tendres se dissolvant à l'acide, disséminés : carbonates.
- Modules durs, brun-rouge : minerai de fer, latérites.
- Nombreuses fissures allongées, larges, profondes et peu espacées (5 à 6 cm ou moins) : illites riches en calcium et montmorillonites.
- Même type de fissures espacées de 30 cm ou plus : illites.
- Sols glaiseux, friables et à texture ouverte contenant pas mal d'argile : présence de carbonates, d'allophanes ou de kaolins mais jamais de montmorillonites, très rarement de l'illite.
- Même type de sols que précédemment mais de couleur noire : sols organiques, tourbes.
- Même type de sols mais très peu argileux : carbonates, limons et sables.

ANALYSES D'ENVIRONNEMENT ET DE PROFIL

L'observation porte sur les talus naturels ou artificiels, les tranchées, les trous, où les minéraux argileux sont dominants; on note les couleurs de la terre et la clarté des eaux de surface du proche voisinage.

TEST D'EMERSON

Ce test s'effectue sur une petite motte de terre non travaillée, de la taille d'un haricot, directement extraite du sol que l'on compte employer. L'échantillon est immergé dans un récipient translucide contenant de l'eau très pure; de l'eau distillée ou de l'eau de pluie conviennent. Aucun agent de dispersion n'est ajouté à l'eau. On observe le comportement de la petite motte de terre immergée, après quelques minutes, selon la procédure indiquée par le diagramme. Ce test permet une évaluation grossière de la nature des argiles.



(1) Si la miette n'est pas sèche à la 1ère immersion, le test reste valable mais cette catégorie comprendra des illites et montmorillonites ainsi que les sols organiques.

(2) La dispersion est plus rapidement détectée par la formation d'un halo entourant chaque miette si on effectue l'observation sur un fond sombre. Plus le halo est prononcé, plus le sol se disperse.

(3) Prendre une nouvelle motte fraîche, l'humidifier, la triturer légèrement et l'immerger.

(4) Om peut facilement vérifier la présence de carbonate en constatant l'effervescence du sol par attaque à l'acide.

(5) Il n'y a pas dispersion lorsque, après dix minutes, la partie supérieure du liquide est redevenue claire.

ANALYSES CHIMIQUES

Les laboratoires qui effectuent des analyses chimiques des terres proposent, en guise de réponse, des listes de divers éléments chimiques en présence et leur quantité en pourcentage. Ces listes sont plus ou moins longues, selon la nature de la terre, selon l'équipement et l'expérience du laboratoire ou selon la demande exprimée. Une liste type comprend les éléments suivants :

. Oxydes de fer;
. Oxydes de magnésium;
. Oxydes d'aluminium;
. Oxydes de calcium (*);
. Carbonates;
. Sulfates;
. Sels solubles et insolubles;
. Perte au feu (*);
. Eau de constitution (*);

(*) : Ces éléments publiés dans le bilan chimique ne sont pas interprétés.

D'autres éléments peuvent être importants à connaître, tels que :

. Nature des matières organiques ou humiques;
. pH (acidité ou alcalinité);
. Capacité d'échange ionique;
. Etc ...

Les méthodes d'analyse chimique pratiquées en laboratoire sont bien établies mais demeurent assez complexes. Elles ne sont en tout cas pas adaptées aux pratiques de terrain. Des essais simples de terrain sont à priori nécessaires. Ils donnent des indications d'une précision raisonnable et montrent s'il est utile d'engager une analyse chimique de laboratoire. Ces essais de terrain permettent d'évaluer la présence de sels solubles et donc le pH de la terre. Si elle est acide, c'est que l'on est en présence de matières organiques, de sels de fer, p.e. Si elle est alcaline, c'est qu'elle contient des carbonates, des sulfates, des chlorides, p.e.

1 - SELS SOLUBLES

Leur quantité, dans un échantillon de terre peut être estimée de façon assez précise par lessivage. L'échantillon est tout d'abord séché au four et pesé puis il est lessivé à l'eau chaude avant de sécher et d'être de nouveau pesé. La quantité de sels solubles est précisée par différence.

2 - pH

Dans un récipient qui contient de la terre et de l'eau, préalablement agité puis reposé, on verse du "rouge de méthyle". Le liquide qui surnage la terre prend une teinte rouge si le sol est acide, jaune dans le cas contraire. On peut également utiliser des indicateurs de papier coloré.

3 - SELS ACIDES

Dans un récipient contenant de la terre et de l'eau distillée, agité puis reposé, on trempe un papier pH qui donnera une indication acide en présence de sels acides.

4 - MATIERES ORGANIQUES OU HUMIQUES

Leur concentration dans un sol est détectable à leur odeur de moisi ou à leur couleur sombre ou café, bleu ou gris foncé, vert sombre. On peut également réaliser des essais de couleur standardisés ou des essais de coloration simplifiés.

L'essai standard de détection de matières organiques consiste à agiter un mélange de terre et de solution d'hydroxyde de sodium puis à comparer la couleur obtenue avec une solution standard d'acide tannique. Bien que ce test soit limité, il n'en est pas moins accepté par l'A.S.T.M. et la B.S.I. Déceler la présence de matières organiques est important mais connaître leur qualité l'est encore plus et ce test demeure insuffisant pour ce faire. On peut aussi réaliser un test de dépistage de l'humus.

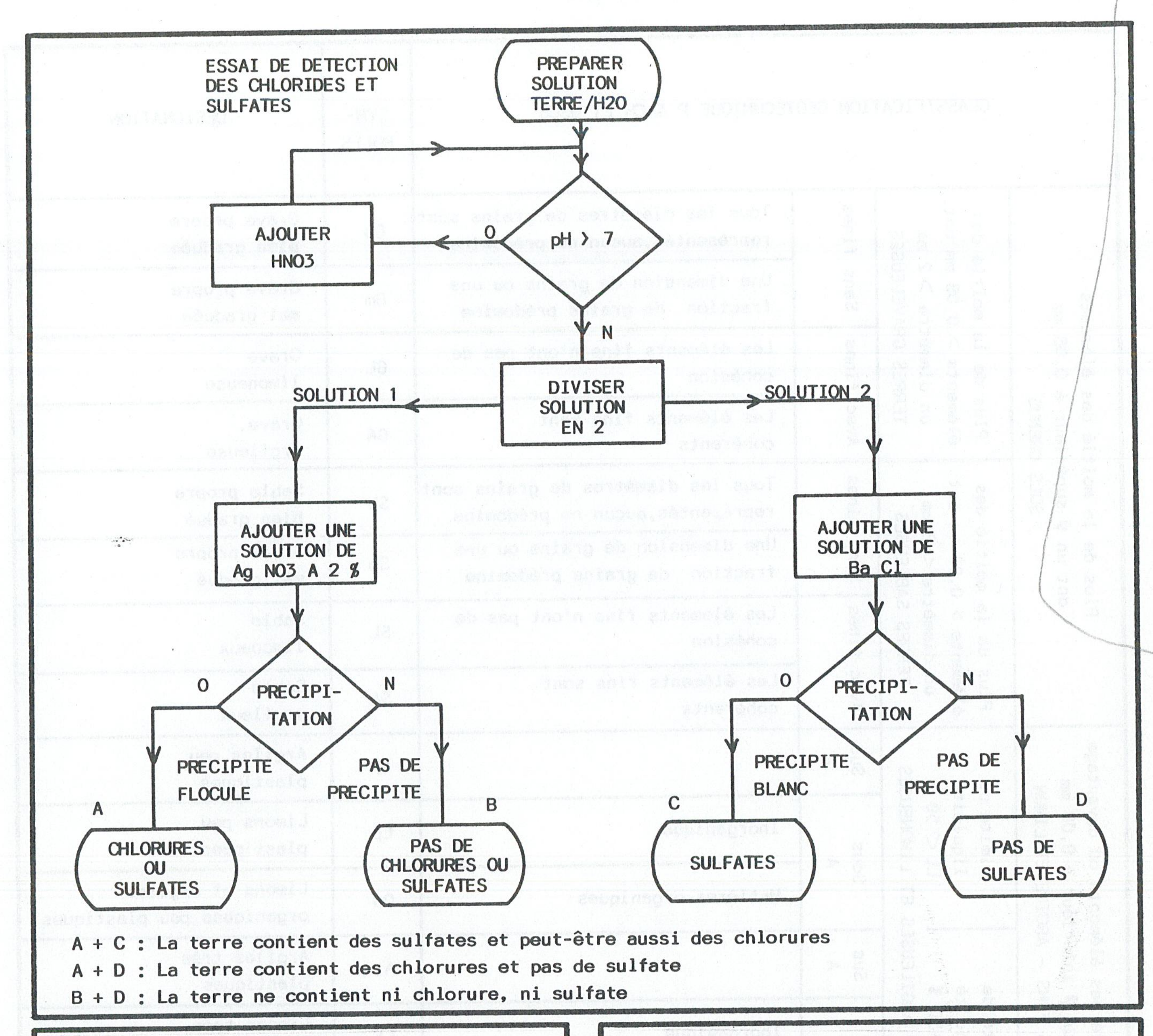
- Préparer 300 à 400 ml de solution de soude(NaOH) ou de potasse (KOH) diluée à 3 % (9 à 12 g). Si l'on ne dispose pas de soude ou de potasse,on peut préparer du lait de chaux en délayant 1kg de chaux aérienne dans 3 l d'eau. Le lait de chaux est récupéré après une nuit de repos, par siphonnage.
- On introduit dans l'une des solutions préparées 50 à 100 g de terre sèche brisée et l'on mélange avec soin en agitant vigoureusement.
- Le mélange repose au moins 24 h, 48 h pour l'emploi du lait de chaux.
- Après une nouvelle agitation énergique et une petite période de repos, on observe la couleur de la solution qui surnage : couleur brune ou noire: beaucoup d'humus; couleur rose pâle ou neutre: peu d'humus.

5 - SELS ALCALINS

La solution de terre et d'eau pure vire au violet lorsqu'on lui ajoute un peu de phénolphtaline (à 1 %) - 1/2 verre de terre + 2/3 d'eau. Les sels alcalins se détectent aussi avec un papier pH trempé dans la solution.

6 - CARBONATES

Leur présence dans une terre est détectée par une effervescence lorsque l'on met sur un échantillon de terre une goutte d'acide nitrique (dilué à 5 %) ou d'acide chloridrique (HCl) dilué à 1:3 (1 vol. d'HCl concentré pour 3 vol. d'eau distillée) . Il convient de manipuler avec grande précaution ces solutions extrêmement dangereuses pour la peau.



QUANTITE DE SULFATES

Préparer 10 solutions standards d'eau distillée et de chlorure de barium (BaCl) dans des tubes à essai, successivement dosées à 0,05 %; 0,1 %; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4 et 0,5 %. Dissoudre 10 g de terre dans de l'eau distillée, filtrer et ajouter une goutte de chlorure de barium. La présence de sulfates est décelée par la formation d'un précipité blanc. Comparer le test avec les tubes à essais de référence qui contiennent des quantités de sulfates connues et une quantité identique de chlorure de barium.

QUANTITE DE CHLORURES

Remplir une burette graduée de nitrate d'argent jusqu'au trait 0. Verser 100 ml d'une solution de terre + eau distillée dans un flacon gradué. Y verser 3 gouttes de phénolphtaléine/TA. Si l'eau vire au rose, ajouter de l'acide oxalique goutte à goutte, jusqu'à décoloration. Avec la burette, ajouter goutte à goutte du nitrate d'argent jusqu'à obtenir une couleur rouge brique. Soit A le nombre de degrés de nitrate d'argent utilisé. Remettre la burette à 0 et recommencer l'opération avec de l'eau déminéralisée (essai à blanc); soit B le nombre de degrés de $AgNO_3$ utilisé. La différence A-B exprime la concentration des chlorures dans la solution testée, en degrés. Ce nombre multiplié par 7,1 donne la concentration en ions chlorures exprimée en mg/l.

CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE P & CH ET USCS				SYMBOLES	DESIGNATION
Plus de la moitié des éléments ont un Ø supérieur à 0,08 mm SOLS GRENUS	Plus de la moitié des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm TERRES GRAVELEUSES	Sans fines	Tous les diamètres de grains sont représentés, aucun ne prédomine	Gb	Grave propre bien graduée
			Une dimension de grains ou une fraction de grains prédomine	Gm	Grave propre mal graduée
		Avec fines	Les éléments fins n'ont pas de cohésion	GL	Grave limoneuse
			Les éléments fins sont cohérents	GA	Grave argileuse
	Plus de la moitié des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm TERRES SABLEUSES	Sans fines	Tous les diamètres de grains sont représentés, aucun ne prédomine	Sb	Sable propre bien gradué
			Une dimension de grains ou une fraction de grains prédomine	Sm	Sable propre mal gradué
		Avec fines	Les éléments fins n'ont pas de cohésion	SL	Sable limoneux
			Les éléments fins sont cohérents	SA	Sable argileux
La moitié des éléments ou davantage ont un Ø inférieur à 0,08 mm SOLS FINS - ARGILE ET LIMON	TERRES ARGILEUSES ET LIMONEUSES — Limite de liquidité LL < 50 %	Sus A		Ap	Argiles peu plastiques
		Sous A	Inorganique	Lp	Limons peu plastiques
			Matières organiques	Op	Limons et Argiles organiques peu plastiques
	TERRES ARGILEUSES ET LIMONEUSES — Limite de liquidité LL > 50 %	Sus A		At	Argiles très plastiques
		Sous A	Inorganique	Lt	Limons très plastiques
			Matières organiques	Ot	Limons et Argiles organiques très plastiques
Les matières organiques prédominent. Reconnaissables à l'odeur, la couleur sombre, la texture fibreuse, la faible densité humide				T	Tourbes et autres sols très organiques

NOTES

- Cette classification est une version simplifiée et adaptée.
- On ne tient pas compte des éléments de diamètre supérieur à 60 mm.
- Le poids des fractions granulaires peut être estimé.
- Les fractions granulaires correspondent au diagramme granulométrique "G".

CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE P & CH ET USCS					SYMBOLES	DESIGNATION
PLUS DE LA MOITIE DES GRAINS ONT UN DIAMETRE ≥ 0,08 mm F < G + D	PLUS DE LA MOITIE DES GRAINS > 0,08 mm ONT UN DIAMETRE > 2 mm G < D	F ⋘ G + D	Tous les diamètres de grains sont représentés, aucun ne prédomine		Gb	Grave propre bien graduée
			Une dimension de grains ou une fraction de grains prédomine		Gm	Grave propre mal graduée
		F ≪ G + D	Les éléments fins n'ont pas de cohésion		GL	Grave limoneuse
			Les éléments fins sont cohérents		GA	Grave argileuse
	PLUS DE LA MOITIE DES GRAINS > 0,08 mm ONT UN DIAMETRE < 2 mm G > D	F ⋘ G + D	Tous les diamètres de grains sont représentés, aucun ne prédomine		Sb	Sable propre bien gradué
			Une dimension de grains ou une fraction de grains prédomine		Sm	Sable propre mal gradué
		F ≪ G + D	Les éléments fins n'ont pas de cohésion		SL	Sable limoneux
			Les éléments fins sont cohérents		SA	Sable argileux
PLUS DE LA MOITIE DES GRAINS ONT UN DIAMETRE < 0,08 mm F ≫ G + D	MOYENNE A GRANDE	NULLE A TRES LENTE	MI-DUR	COURT A LONG	Ap	Argiles peu plastiques
	NULLE A FAIBLE	RAPIDE A LENTE	FRAGILE A NUL	COURT A NUL	Lp	Limons peu plastiques
	FAIBLE A MOYENNE	LENTE	MOU OU SPONGIEUX	COURT A NUL	Op	Limons et Argiles organiques peu plastiques
	GRANDE A TRES GRANDE	NULLE	DUR	LONG	At	Argiles très plastiques
	FAIBLE A MOYENNE	LENTE A NULLE	MI-DUR	COURT	Lt	Limons très plastiques
	MOYENNE A GRANDE	NULLE A TRES LENTE	FRAGILE A MOU	COURT	Ot	Limons et Argiles organiques très plastiques
ESSAIS	RESISTANCE A SEC	RESSUAGE	CONSISTANCE	COHESION		

- La classification géotechnique P & CH et USCS préliminaire d'une terre est basée sur des observations visuelles et procède par élimination en partant du côté gauche du tableau de classification pour aller jusqu'au côté droit où l'on obtient le symbole du groupe. Une information descriptive doit compléter la désignation symbolique générale; p.e., Ap : argile peu plastique, sableuse avec prédominance de sables fins, légère présence de graviers.

- Beaucoup de terres ont des propriétés qui ne les classent pas dans un groupe précis mais dans deux ou plusieurs groupes ou les situent à la frontière de deux groupes, à cause de la dimension de leurs grains ou de leur plasticité. Pour ces terres, des classifications subtiles emploient des symboles doubles issus de deux grands groupes et reliés par un trait d'union; p.e. : Gb-GA, SA-Ap, Lp-Ap, etc ...

- Agib, A.R.A.; El Jack, S.A. Foundations on expansive soils. In Digest, Khartoum, NBRS, 1976.
- Beitdatsch, A. Wohnhaüser aus Lehm. Berlin, Hermann Hübener, 1946.
- Bertram, G.E.; La Baugh WM.C. Soil tests. Washington, American Road Builders' Association, 1964.
- Bureau of reclamation. Earth manual. Washington, US Department of the Interior, 1974.
- CINVA. Le béton de terre stabilisé, son emploi dans la construction. New York, Nations Unies, 1964.
- Department of Housing and Urban Development. Earth for homes. In Ideas and methods exchange, Washington, Office of International Affairs, 1955.
- Doat, P. et al. Construire en terre. Paris, éditions Alternatives et Parallèles, 1979.
- Hays, A. De la terre pour bâtir. Manuel pratique. Grenoble, UPAG, 1979.
- Hernández Ruiz, L.E.; Márquez Luna, J.A. Cartilla de pruebas de campo para selección de tierras en la fabricación de adobes. México, CONESCAL, 1983.
- Houben, H. Technologie du béton de terre stabilisé pour l'habitat. Sidi Bel Abbes, CPR, 1974.
- Ingles, O.G.; Metcalf, J.B. Soil stabilization. Sydney, Butterworths, 1972.
- Knaupe, W. Erdbau. Düsseldorf, Bertelsmann, 1952.
- Markus, T.A. et al. Stabilised soil. Glasgow, University of Strathclyde, 1979.
- Peltier, R. Manuel du laboratoire routier. Paris, Dunod, 1969.
- Pollack, E.; Richter, E. Technik des Lehmbaues. Berlin, Verlag Technik, 1952.
- Post, G.; Londe, P. Les barrages en terre compactée. Paris, Gauthier-Villars, 1953.
- Sharma, S.K.; Vasudeva, P.N. Making soil stabilized bricks. Chandigarh, Punjab Eng. College.
- Van Olphen, H. An introduction to clay colloid chemistry. New York, John Wiley and Sons, 1977.
- Vatan, A. Manuel de sédimentologie. Paris, Technip, 1967.
- Volhard, F. Leichtlehmbau. Karlsruhe, CF Müller GmbH, 1983.
- Wagner, W. Anleitung zur Untersuchung und Beurteilung von Baulehmen. Dotzheim, Hessischen Lehmbaudienst Wiesbaden, 1947.
- Wolfskill, L.A. et al. Bâtir en terre. Paris, CRET.

400 STABILISATION

Les caractéristiques de très nombreuses variétés de terre peuvent être améliorées considérablement grâce à l'ajout de stabilisants. Mais, à chaque variété de terre correspond le stabilisant approprié. On dénombre à ce jour plus d'une centaine de produits employés pour la stabilisation des sols ou des terres à bâtir. Ces stabilisants peuvent être employés aussi bien dans la masse des murs que dans leur "peau" : dans les enduits p.e. La stabilisation est pratiquée de très longue date mais c'est à partir des années 1920 que fut développée une approche scientifique, avec un cumul de recherches dans les années 1940 à 1960 qui se perpétue de nos jours. Mais, malgré cela, la stabilisation n'est toujours pas une science exacte et l'on ne connaît pas à ce jour un stabilisant "miracle" qui répondrait à tous les problèmes. Les méthodes de stabilisation les plus connues et les plus pratiquées sont : la densification des terres par compression, l'armature de fibres, l'ajout de ciment, de chaux ou de bitume. Beaucoup d'autres produits existent, sont employés ou proposés, mais ils n'ont reçu que très peu d'attention et leurs mécanismes ainsi que leur efficacité sont mal connus. Confronté à un problème de stabilisation, il convient de choisir un produit parmi la multitude de possibilités dont beaucoup ne devront même pas être envisagées, soit du fait de leur inefficacité, soit du fait de leur coût prohibitif.

Il existe une tendance actuelle à la stabilisation systématique et souvent selon des méthodes incontrôlées. Ceci est regrettable car il ne faut pas oublier que la stabilisation ne contribue qu'à améliorer les caractéristiques d'un sol ou d'une terre ou à les doter de bonnes caractéristiques qui leur font défaut. Il est fort dommage que de très nombreux adeptes de la stabilisation systématique apprécient mal les performances initiales de la terre,s'engageant souvent trop vite dans cette voie qui n'est pas forcément utile.

PROBLEMATIQUE

Construire en terre dans un lieu donné implique un choix entre 3 possibilités principales :
- Employer la terre disponible sur le site et adapter au mieux le projet à la qualité de cette terre.
- Employer une autre terre, importée sur le site, qui convient mieux aux exigences du projet.
- Modifier la terre locale pour qu'elle convienne au mieux aux exigences du projet.

C'est cette troisième possibilité que l'on dénomme stabilisation de la terre et qui définit l'ensemble des procédés permettant une amélioration des caractéristiques de la terre.

DEFINITION

Stabiliser la terre c'est modifier les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière. Mais, la stabilisation est un problème complexe, car de très nombreux paramètres interviennent. Il faut en effet connaître:
- Les propriétés de la terre à stabiliser.
- Les améliorations envisagées.
- L'économie du projet : coûts et délais de réalisation.
- Les techniques de mise en oeuvre de la terre choisies pour le projet et les systèmes constructifs.
- La maintenance du projet réalisé : coût d'entretien.

L'amélioration des propriétés de la terre par stabilisation sera un succès si le procédé employé sera compatible avec les impératifs du programme : coût et délais de réalisation, coût d'entretien notamment.

OBJECTIFS

On ne peut intervenir que sur 2 caractéristiques de la terre elle-même: sa texture et sa structure. On dispose de 3 possibilités d'intervention sur la texture et la structure :
- Réduire le volume des vides entre les particules : agir sur la porosité.
- Colmater les vides qui ne peuvent être supprimés : agir sur la perméabilité.
- Améliorer les liens entre les particules : agir sur la résistance mécanique.

Les principaux objectifs poursuivis sont :
- Obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques : augmenter la résistance à la compression sèche et humide, la résistance à la traction et au cisaillement.
- Obtenir une meilleure cohésion.
- Réduire la porosité et les variations de volume: gonflement-retrait à l'eau.
- Améliorer la résistance à l'érosion du vent et de la pluie : réduire l'abrasion de surface et imperméabiliser.

PROCEDES

On dénombre 3 procédés de stabilisation :

1 - **STABILISATION MECANIQUE** : c'est le compactage de la terre qui modifie sa densité, sa résistance mécanique et sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité.

2 - **STABILISATION PHYSIQUE** : les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur la texture : mélange contrôlé de fractions de grains différentes p.e. Egalement par traitement thermique : déshydratation ou gel; ou par un traitement électrique : électro-osmose qui favorise un drainage de la terre, lui conférant de nouvelles qualités structurales.

3 - **STABILISATION CHIMIQUE** : la terre est ajoutée d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physico-chimique entre les particules et le matériau ou le produit ajouté, soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. La réaction physico-chimique peut entraîner la formation d'un nouveau matériau : composé pouzzolanique issu d'une réaction entre l'argile et la chaux p.e.

QUAND STABILISER ?

La stabilisation n'est pas une obligation. On peut très bien s'en passer et construire en terre sans stabiliser.

Pourtant, on relève une tendance actuelle qui préconise un recours trop systématique à la stabilisation, solution panassée à tous les problèmes. Cette attitude est regrettable car la stabilisation peut être à l'origine d'un surcoût important: de 30 à 50 % du prix de revient du matériau. D'autre part, la stabilisation complique la production du matériau : études préalables de comportement du matériau plus longues p.e.

Il convient donc d'insister sur le fait que le recours à la stabilisation ne doit être envisagé qu'en cas de nécessité absolue et qu'il doit être évité dans un contexte d'économie de pénurie.

Si l'on prend en compte les risques d'une exposition du matériau à l'eau, on pourra dire :

- NE PAS STABILISER lorsque le matériau n'est pas exposé à l'eau : murs protégés, murs enduits, murs intérieurs, architecture bien conçue en fonction de la logique du matériau terre.
- STABILISER lorsque le matériau est exposé : architecture mal conçue, négligeant les règles de l'art de bâtir en terre, ou contraintes d'implantation : terrain humide, murs exposés aux pluies battantes, p.e.

Mais, on peut avoir recours à la stabilisation pour d'autres raisons :

- Pour améliorer la résistance à la compression, p.e.
- Pour densifier le matériau ou au contraire l'alléger, p.e.

MOYENS DE STABILISATION

- Pour des terres non remaniées, la stabilisation s'opère généralement par injection ou par imprégnation. Mais cette technique est peu employée dans le domaine de la construction en terre, étant davantage appliquée aux travaux publics, aux ouvrages d'art, au traitement des fondations ou même dans le domaine de la préservation des monuments historiques.
- Pour des terres remaniées, les procédés de stabilisation sont très nombreux et la littérature a produit divers systèmes de classification. Les stabilisants peuvent être classés, p.e., selon leur nature : végétale ou animale, minérale ou synthétique, etc ... ou bien selon leur forme : en poudre, en fibres, en plaquettes, en pâte, liquide, etc ...

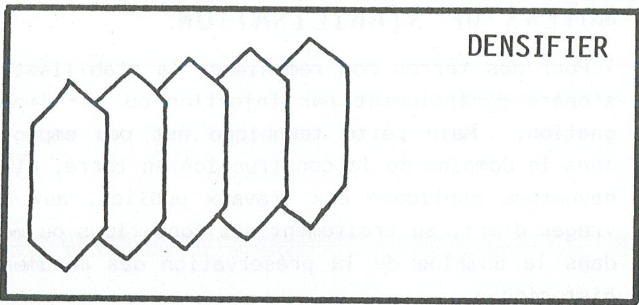
On peut simplifier la classification en dénombrant 6 principaux modes de stabilisation :

- Densifier.
- Armer.
- Enchaîner.
- Liaisonner.
- Imperméabiliser.
- Hydrofuger.

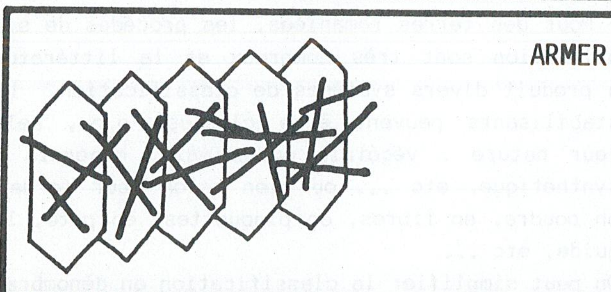
Chaque stabilisant n'agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés : physique et chimique p.e.

MOYENS DE STABILISATION DES TERRES REMANIEES

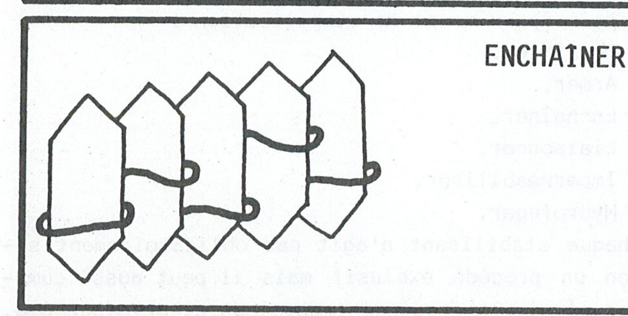
STABILISANT		NATURE	PROCEDE	MOYENS	PRINCIPE	SYMBOLE
SANS APPORT DE STABILISANT			MECANIQUE	DENSIFIER	CREER UN MILIEU DENSE QUI BLOQUE LES PORES ET LES CANAUX CAPILLAIRES	
AVEC APPORT DE STABILISANT	STABILISANTS INERTES	MINERAUX	PHYSIQUE	ARMER	CREER UNE ARMATURE OMNIDIRECTIONNELLE QUI REDUIT LE MOUVEMENT	
		FIBRES		ENCHAINER	CREER UN SQUELETTE INERTE QUI S'OPPOSE A TOUT MOUVEMENT	
	STABILISANTS PHYSICO-CHIMIQUE	LIANTS	CHIMIQUE	LIAISONNER	FORMER DES LIAISONS CHIMIQUES STABLES ENTRE LES CRISTAUX D'ARGILE	
		HYDROPHOBANTS		IMPERMEABILISER	ENTOURER LES GRAINS DE TERRE D'UN FILM IMPERMEABLE ET BOUCHER LES PORES ET CANAUX	
				HYDROFUGER	ELIMINER AU MAXIMUM L'ABSORPTION ET ADSORPTION D'EAU	



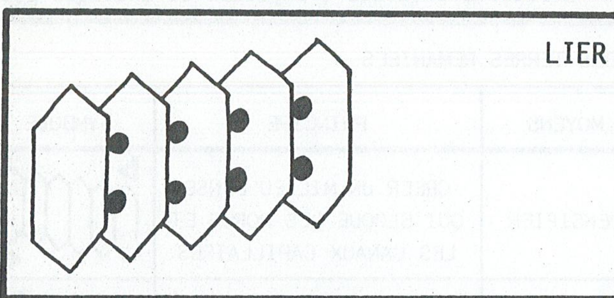
Il y a deux manières différentes pour densifier :
1 - Soit en manipulant la terre, mécaniquement, de façon à évacuer un maximum d'air: en pétrissant et en comprimant la terre. La texture de la terre ne varie pas mais l'on change sa structure car on redistribue les grains. La terre n'est pas simplement comprimée dans son état originel, elle est préalablement triturée pour la rendre plus homogène, puis comprimée. Au-delà de la phase



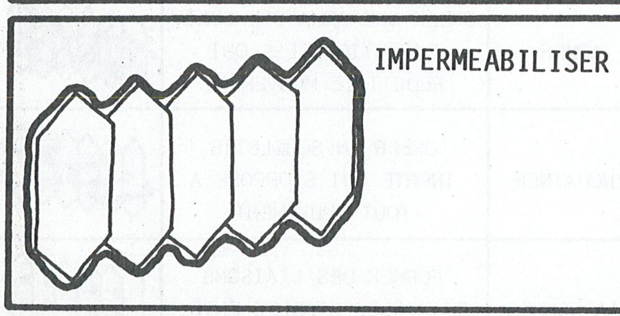
Si, pour diverses raisons, on n'est pas amené à intervenir sur la texture de la terre et que le matériau demeure très sensible aux mouvements divers induits par des causes différentes telles que: compression, traction, action de l'eau, dilatation thermique, etc ... on peut alors opposer à ces mouvements une armature. Cette armature est constituée de fibres de nature diverse: fibres végétales, animales, fibres minérales ou synthéti-



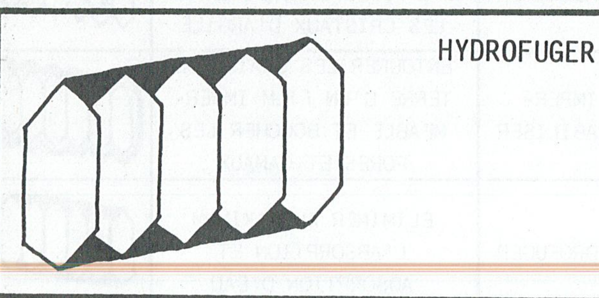
On introduit dans la structure de la terre une matrice tridimensionnelle inerte et résistante qui va s'opposer à tout mouvement de la terre. Il s'agit d'une action de consolidation par cimentation qui résulte d'un remplissage des vides par un liant insoluble capable d'enrober les particules dans une matrice inerte. Le principal stabilisant qui agit selon ce mécanisme est le ciment portland. Des résultats similaires sont obtenus



Dans ce cas, la matrice inerte introduite dans la terre inclut les argiles. On connaît 2 mécanismes qui donnent le même résultat :
1 - Une matrice inerte est formée par les argiles: on utilise les charges négatives et positives des plaquettes argileuses ou leur composition chimique pour les lier entre elles par l'intermédiaire d'un stabilisant qui joue le rôle de lien ou le rôle de catalyseur de cette liaison. Certains stabili-



Ce mode de stabilisation contribue à réduire l'érosion à l'eau, le gonflement et le retrait aux cycles répétés de mouillage-séchage. On connaît 2 possibilités d'imperméabilisation :
1 - Tous les vides, les pores, les fissures et microfissures sont remplis d'une matière qui est insensible à l'eau. Le bitume est l'exemple d'un des meilleurs produits qui agissent dans ce sens. Cette méthode de stabilisation convient particuli-



Dans ce cas, on intervient sur le mouvement de l'eau et de la vapeur d'eau dans la terre, soit en changeant la nature de l'eau, soit en réduisant la sensibilité des plaquettes d'argile à l'eau. On dénombre 3 systèmes :
1 - Modifier l'état de l'eau intersticielle : en séchant le sol par l'introduction de chloride de calcium qui augmente la tension de surface, diminue la pression de la vapeur d'eau et le taux d'é-

de trituration, il est possible - mais non indispénsable - d'employer des dispersants ou des cires qui peuvent faciliter le compactage.
2 - Soit en comblant un maximum des vides par d'autres grains. Pour opérer de cette deuxième façon, la texture doit être parfaite : le vide laissé entre chaque groupe de grains est comblé par un autre groupe de grains. Il s'agit d'une intervention directe sur la texture.

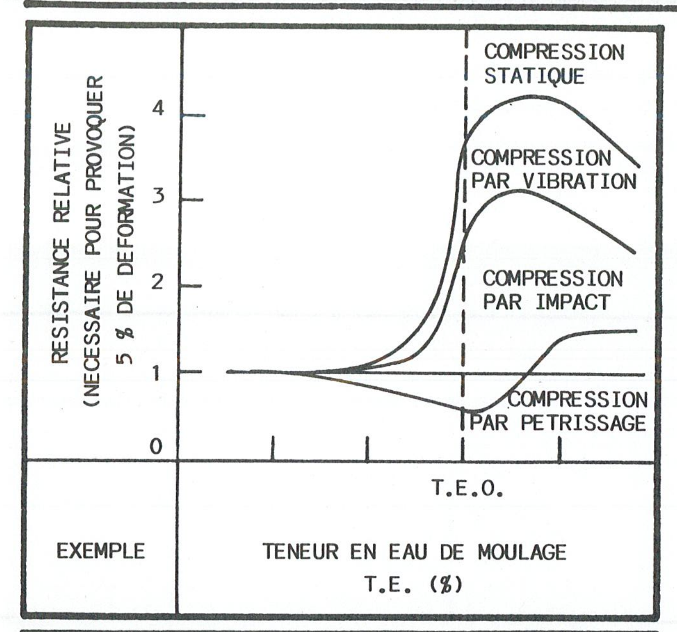
ques. L'armature de fibres n'agit pas à l'échelle des grains mais à une échelle macroscopique, c'est à dire au niveau des agglomérations de grains.

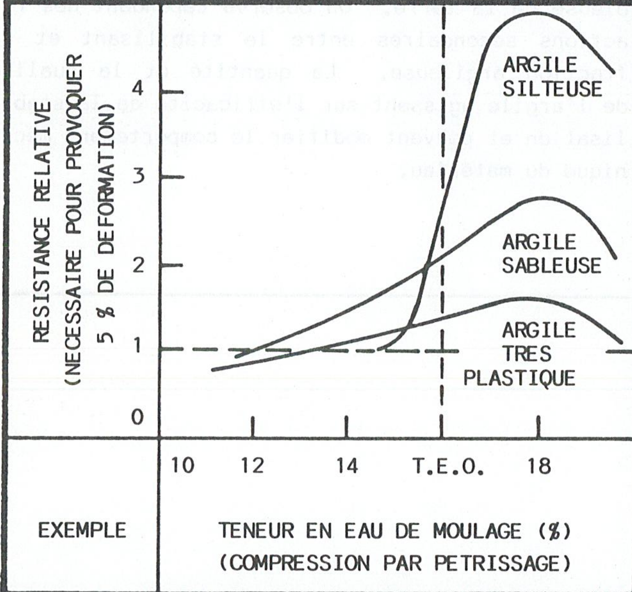
avec des solutions électrolytes de sel de silicate de sodium ou encore avec certaines résines et colles. Du point de vue de la réaction chimique, la caractéristique essentielle de ce mécanisme de stabilisation est que la formation de la matrice inerte demeure relativement indépendante de l'argile. En effet, les principales réactions de consolidation ont lieu dans le stabilisant lui-même et entre le stabilisant et la fraction sableuse de la terre. On observe cependant des réactions secondaires entre le stabilisant et la fraction argileuse. La quantité et la qualité de l'argile agissent sur l'efficacité de la stabilisation et peuvent modifier le comportement mécanique du matériau.

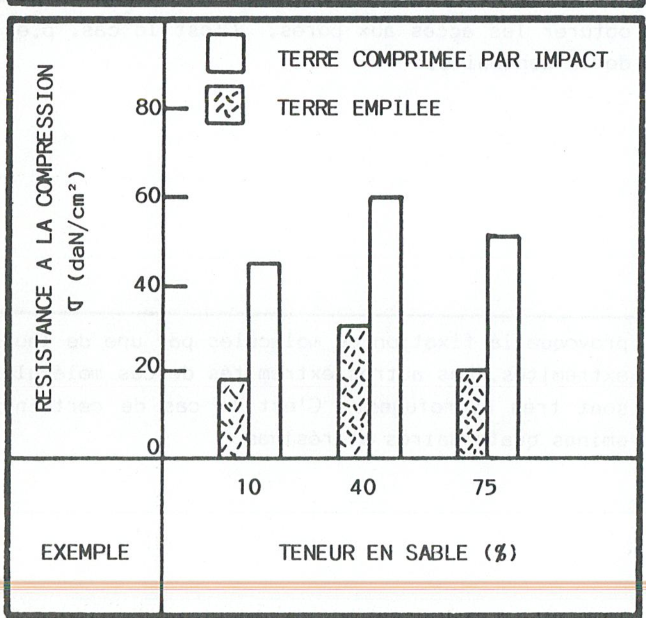
sants chimiques agissent dans ce sens : quelques acides, polymères, floculants, etc ...
2 - Une matrice inerte est formée avec les argiles. Un stabilisant réagit avec l'argile et forme un nouveau matériau insoluble et inerte par précipitation, une sorte de ciment : c'est une réaction pouzzolamique notamment obtenue avec la chaux. C'est une réaction lente essentiellement dépendante de la quantité et de la qualité d'argile.

èrement pour les terres sableuses qui présentent une bonne stabilité de leur volume et qui sont peu affectés par les mouvements de l'eau. Elle est également utilisable pour les terres silteuses et argileuses qui réclament une plus grande quantité de stabilisant du fait de leur surface spécifique plus importante.
2 - Une matière est dispersée dans la terre qui, au moindre contact avec l'eau, va s'expanser et obturer les accès aux pores. C'est le cas, p.e., de la bentonite.

vaporation, réduisant ainsi les variations de quantité d'eau.
2 - Par échange ionique : les ions sont remplacés par d'autres jusqu'à ce qu'une qualité d'ions soit très fortement fixée sur les plaquettes d'argile et que l'eau ne peut délayer. Certains acides activent ce phénomène.
3 - Sur la surface des plaquettes d'argile qui se situent à l'extérieur d'agrégats compacts, on provoque la fixation de molécules par une de leurs extrémités. Les autres extrémités de ces molécules sont très hydrofuges. C'est le cas de certaines amines quaternaires et résines.







Pour tous les matériaux de terre, on constate une relation directe entre la densité sèche et la résistance à la compression. Celle-ci est plus élevée quand le matériau est compact. Durant le processus de rupture, la déformation adopte le chemin qui réclame le moins d'énergie possible, en général balisé par des macropores. Il convient donc que les pores du matériau soient très petits et distribués de façon très homogène. Rares sont les terres naturellement compactes qui peuvent être extraites sous forme de blocs. On dispose le plus souvent de terres qu'il faut remanier. Le soin apporté à ce remaniement, qui conditionne la répartition des pores et leur grosseur, agira sur le comportement du matériau.

METHODES DE COMPRESSION

Il en existe principalement 4 :

- La compression statique;
- La compression dynamique par vibration;
- La compression dynamique par impact;
- La compression par pétrissage.

A chacune de ces méthodes correspond une Teneur en Eau Optimale (T.E.O.) pour laquelle on obtient une densité sèche optimale.

Chaque méthode de compression présente des avantages et des défauts. P.e., le pétrissage favorise une bonne distribution des pores et une homogénéité de leur grosseur dans le produit final, contribuant à réduire sa perméabilité. Mais l'on constate que la résistance au cisaillement est moindre quand on comprime du côté humide, que celle obtenue avec les autres méthodes de compression. Cette résistance est également tributaire de la texture de la terre.

PARAMETRES DU COMPACTAGE

1 - ENERGIE DE COMPACTAGE : quels que soient le type de terre et la méthode de compression, une plus grande énergie de compactage diminue la T.E.O et augmente la densité sèche. Mais, de trop fortes énergies de compactage peuvent produire des effets néfastes : laminage des blocs p.e.

2 - TEXTURE DE LA TERRE : les granularités étroites ne donnent pas de fortes compacités. Par contre, les granularités étalées donnent des courbes de compactage à maximas accentués.

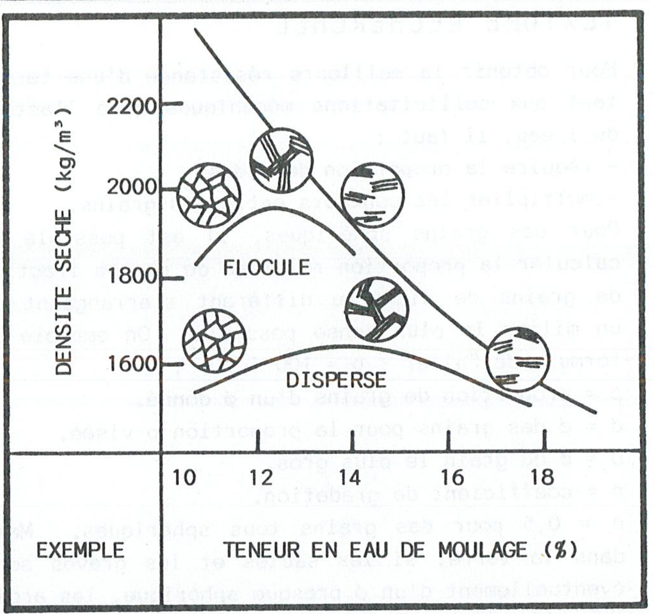
EFFETS DU COMPACTAGE

On observe 2 types principaux de structure des argiles selon l'importance des forces de répulsion ou d'attraction :

1 - STRUCTURE DISPERSEE : les plaquettes d'argiles sont distantes du fait de forces de répulsion prédominantes. Elles ont tendance à être parallèle. L'état dispersé correspond à des teneurs en eau élevées, à droite de l'optimum, sur la courbe de compactage.

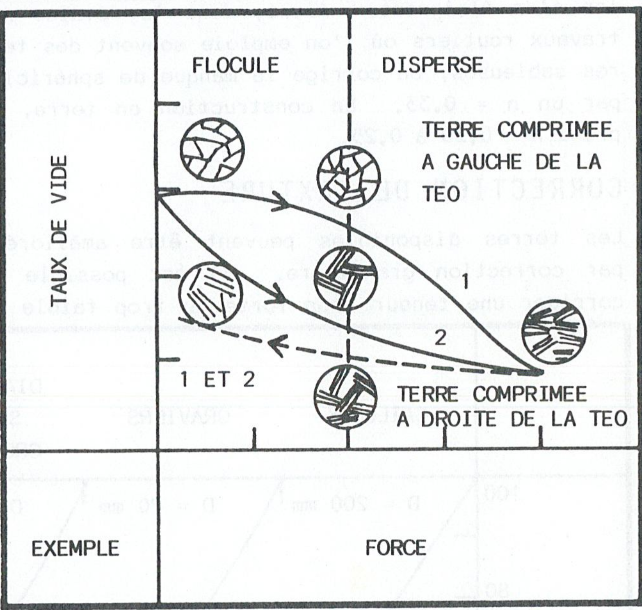
2 - STRUCTURE FLOCULEE : les plaquettes d'argile se rapprochent et forment entre elles des angles importants du fait de forces d'attraction prédominantes. L'état floculé correspond à des teneurs en eau faibles, à gauche de l'optimum, sur la courbe de compactage.

Ainsi, l'optimum de compactage est un état pour lequel les forces d'attraction sont suffisantes pour permettre une bonne compacité alors que les forces de répulsion facilitent une mise en ordre des particules. Pour un compactage effectué dans de bonnes conditions, les effets sont une diminution de la perméabilité, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement d'eau en ambiance humide, ainsi qu'une augmentation des résistances mécaniques initiales et à long terme du matériau.



1 - COMPRESSIBILITE

Tant que la contrainte exercée n'excède pas une certaine valeur, un matériau à structure floculée est moins compressible qu'un même matériau à structure dispersée. Les 2 matériaux tendent vers le même état et une même compressibilité si la pression devient suffisante pour permettre un réarrangement des particules.



2 - ABSORPTION D'EAU ET GONFLEMENT EN AMBIANCE HUMIDE

Ils sont plus importants pour un matériau compacté à l'état floculé et moindre pour un état dispersé.

3 - COMPACTAGE TROP POUSSE

Quand la terre approche un état de saturation, l'incompressibilité de l'eau rend illusoire l'action d'un surcroît de compactage qui n'a alors plus d'effet sur l'arrangement des particules.

Le compactage conditionne pour beaucoup le succès de toute méthode de stabilisation mais il ne faut pas oublier que les améliorations obtenues par le compactage s'annulent pour la plupart en ambiance humide.

INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU DE MOULAGE TE SUR :	COMPRIME A	
	TE < TEO	TE > TEO
STRUCTURE	FLOCULE	DISPERSE
GONFLEMENT	PLUS	MOINS
ABSORPTION	PLUS	MOINS
PERMEABILITE	PLUS	MOINS
RESISTANCE IMMEDIATE	PLUS	MOINS
RESISTANCE FINALE	MOINS	MOINS
DENSITE	MOINS	MOINS

TEXTURE RECHERCHEE

Pour obtenir la meilleure résistance d'une terre, tant aux sollicitations mécaniques qu'à l'action de l'eau, il faut :
- réduire la proportion de vides;
- multiplier les contacts entre les grains.

Pour des grains sphériques, il est possible de calculer la proportion relative de chaque fraction de grains de diamètre différent s'arrangeant en un milieu le plus dense possible. On emploie la formule de Fuller : $p = 100 \, (d/D)^n$.

p = proportion de grains d'un ⌀ donné.
d = ⌀ des grains pour la proportion p visée.
D = ⌀ du grain le plus gros.
n = coefficient de gradation.

n = 0,5 pour des grains tous sphériques. Mais dans la terre, si les sables et les graves sont éventuellement d'un ⌀ presque sphérique, les argiles s'en éloignent. Aussi, dans le domaine des travaux routiers où l'on emploie souvent des terres sableuses, on corrige le manque de sphéricité par un n = 0,33. En construction en terre, on prend n = 0,20 à 0,25.

CORRECTION DE TEXTURE

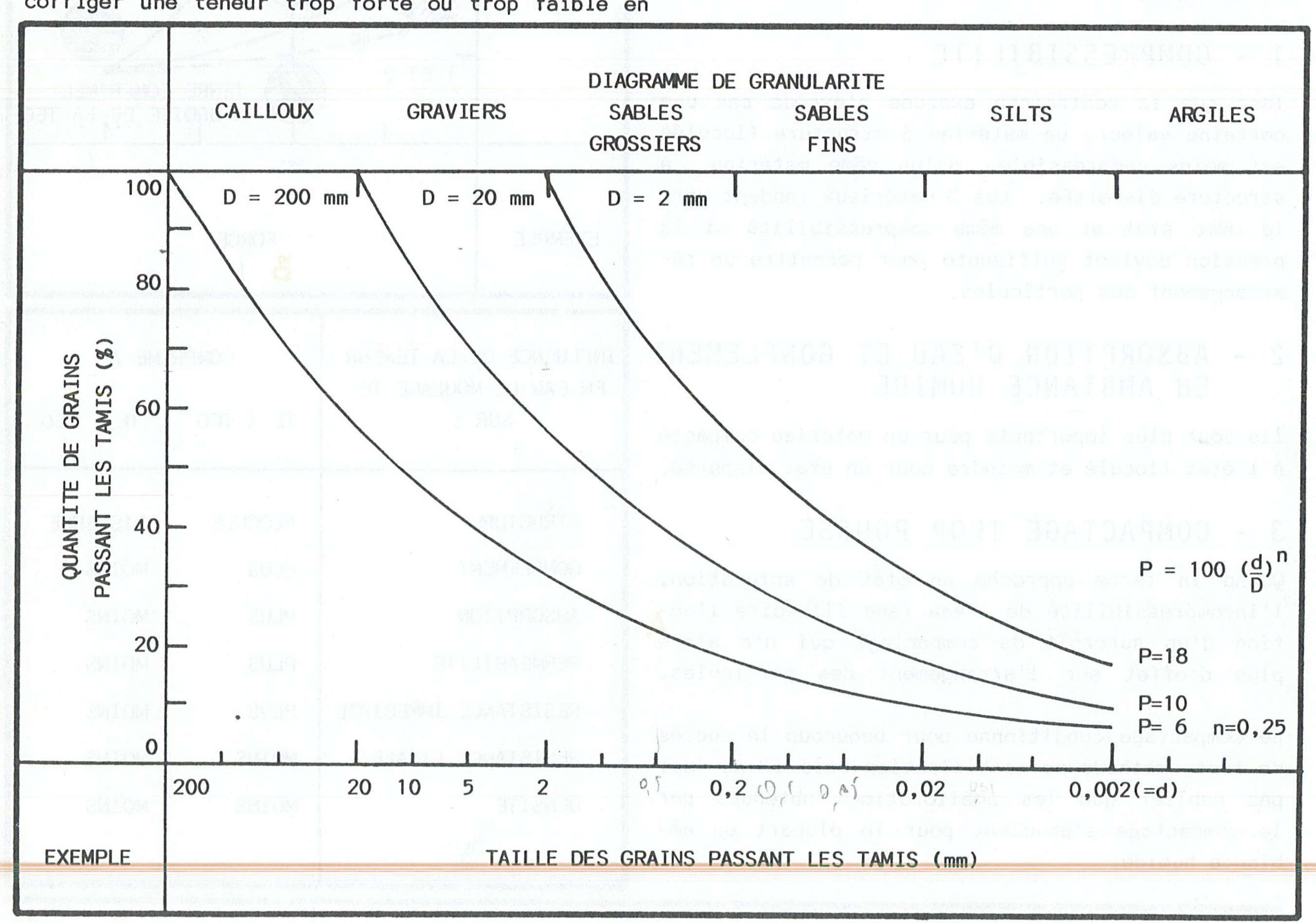
Les terres disponibles peuvent être améliorées par correction granulaire. Il est possible de corriger une teneur trop forte ou trop faible en graves, en sables ou en fines, soit par apport de fractions faisant défaut, soit par exclusion de fractions en excès.

1 - TERRE TROP RICHE EN GRAVES

Pour corriger la texture d'une terre trop riche en graves, il suffit de l'écrêter par tamisage en enlevant les éléments les plus gros. Un épierrement manuel préalable des plus gros cailloux peut être nécessaire.

2 - TERRE TROP RICHE EN FINES

Une terre de ce type peut être améliorée en enlevant les fines par lavage. Néanmoins, cette technique demeure très difficile à contrôler car on risque d'enlever la totalité des fines. Il est préférable de laver entièrement une certaine quantité de terre puis, après séchage, de la mélanger avec la terre initiale. Cette procédure est délicate. Aussi, il conviendra plutôt de réaliser un mélange de la terre initiale avec une terre plus riche en éléments grossiers dont on s'assurera qu'elle ne contient ni fines, ni éléments d'un diamètre supérieur à la grosseur de grain maximale admissible.



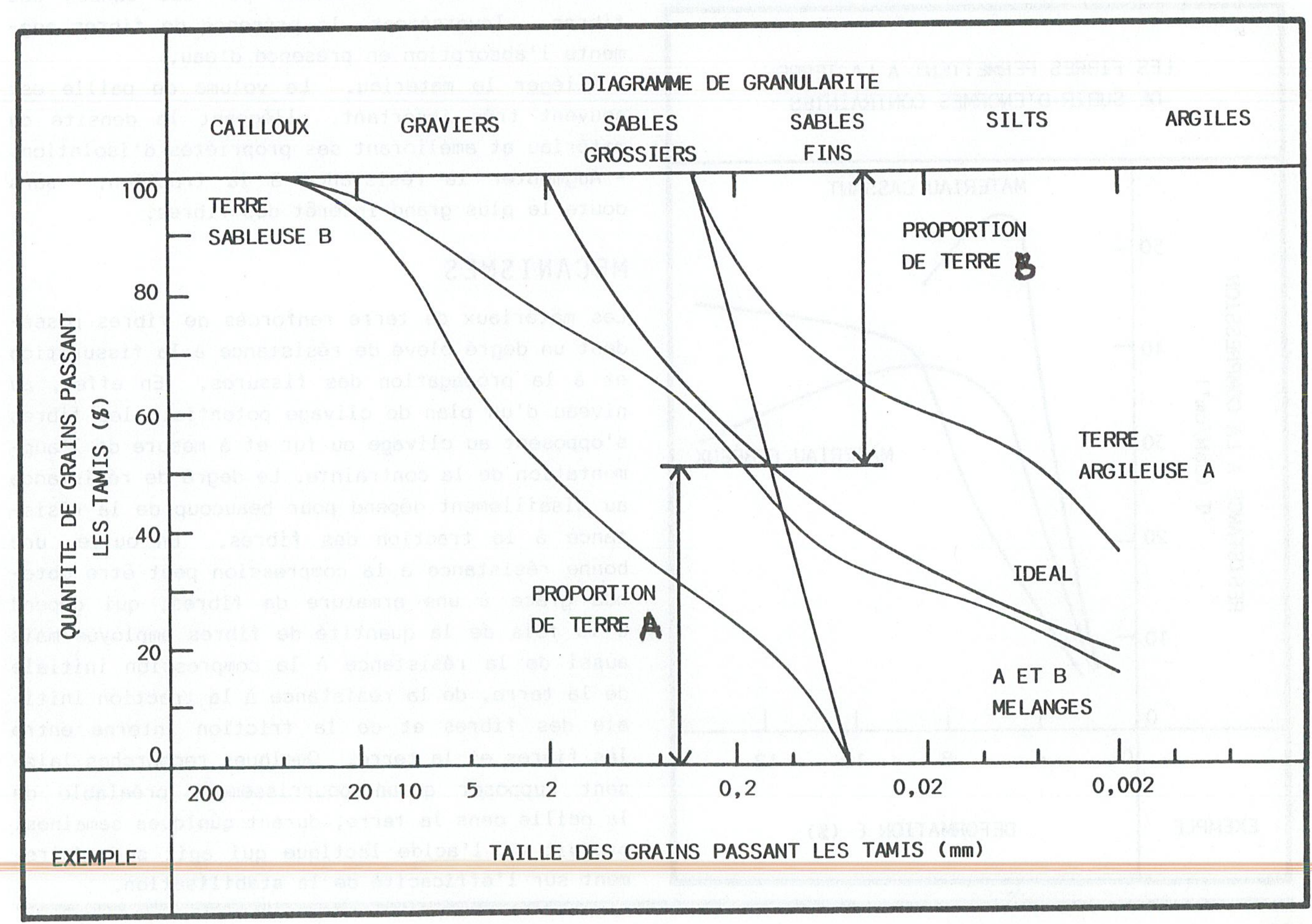
3 - TERRE A TEXTURE DISCONTINUE

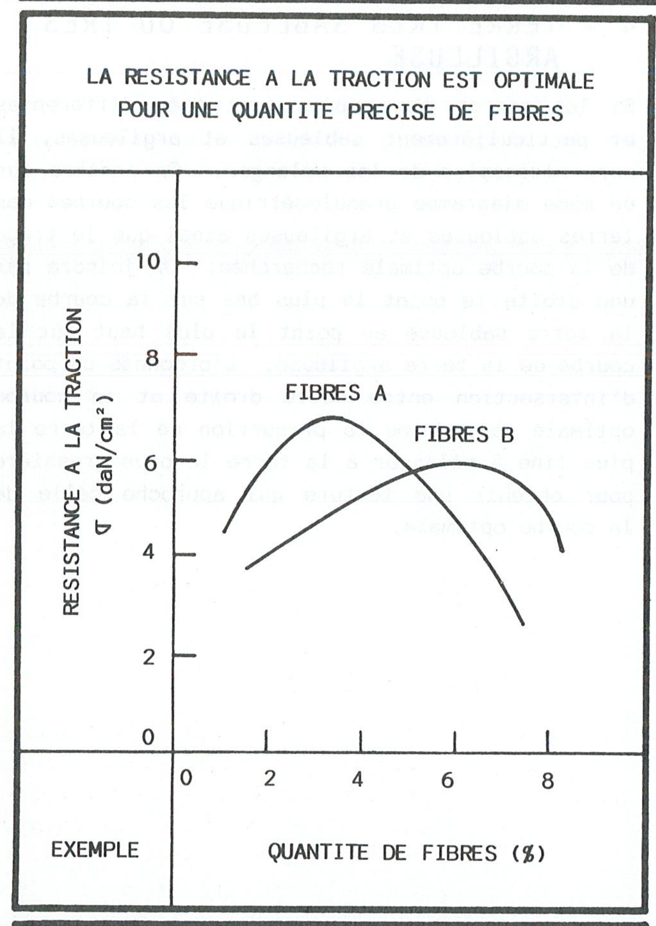
La texture discontinue d'une terre est caractérisée sur la courbe d'analyse granulométrique. On peut en effet observer deux tracés caractéristiques.

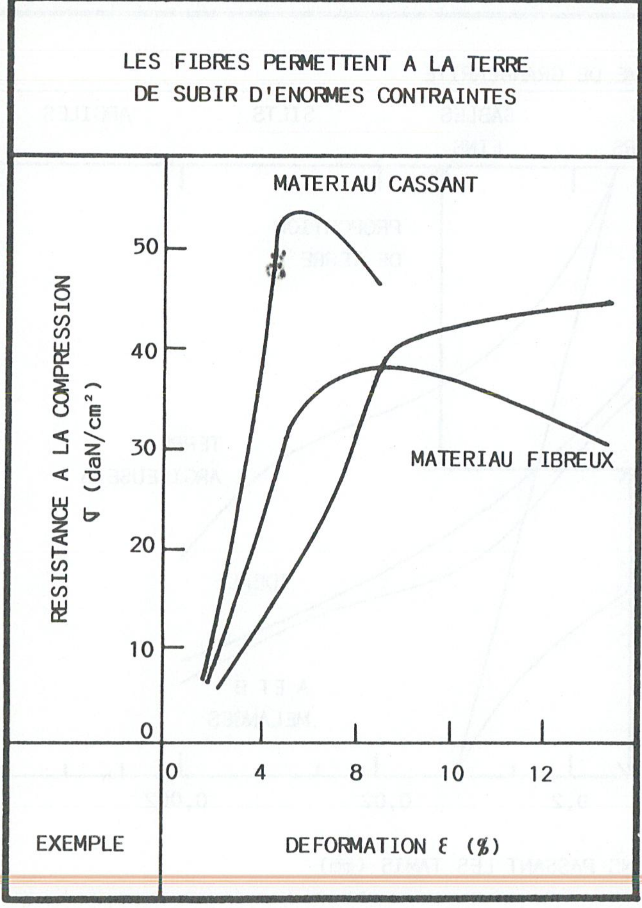
- La courbe est plate pour une fraction de grains déterminée : cette fraction granulaire fait défaut dans la terre analysée. Il conviendra alors d'apporter à la terre les éléments de cette fraction manquante en juste proportion.
- La courbe décrit une ascension très nette pour une fraction de grains déterminée : cette fraction granulaire est trop abondante dans la terre analysée. Il conviendra alors d'exclure une partie de cette fraction par tamisage ou d'équilibrer cet excès par un apport d'autres fractions de grains. Cette procédure ne sera entreprise que si elle s'impose vraiment pour l'obtention de la qualité recherchée du matériau.

4 - TERRE TRES SABLEUSE OU TRES ARGILEUSE

Si les terres disponibles sont très différentes et particulièrement sableuses et argileuses, il sera nécessaire de les mélanger. On portera sur un même diagramme granulométrique les courbes des terres sableuses et argileuses ainsi que le tracé de la courbe optimale recherchée. On joindra par une droite le point le plus bas sur la courbe de la terre sableuse au point le plus haut sur la courbe de la terre argileuse. L'ordonnée du point d'intersection entre cette droite et la courbe optimale nous donne la proportion de la terre la plus fine à mélanger à la terre la plus grossière pour obtenir une texture qui approche celle de la courbe optimale.







La stabilisation par armature à l'aide de fibres, dont très souvent la paille, est très employée de par le monde. La paille doit en fait être considérée comme un agent de renforcement de la structure, au même titre que le gravier. Aujourd'hui, même dans les productions les plus modernes et industrielles, pour l'adobe aux U.S.A. p.e., on incorpore encore très souvent de la paille, combinée avec le bitume. Cette méthode de stabilisation est intéressante car elle est adaptable à différents modes de mise en oeuvre de la terre, à l'état liquide ou plastique et même par compression. Les fibres sont principalement employées pour la confection de blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait. Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connaît aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terre-paille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé.

ROLES DES FIBRES

- Empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dûes au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau.
- Accélérer le séchage grâce à un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres. Inversément, la présence de fibres augmente l'absorption en présence d'eau.
- Alléger le matériau. Le volume de paille est souvent très important, allégeant la densité du matériau et améliorant ses propriétés d'isolation.
- Augmenter la résistance à la traction; sans doute le plus grand intérêt des fibres.

MECANISMES

Les matériaux de terre renforcés de fibres possèdent un degré élevé de résistance à la fissuration et à la propagation des fissures. En effet, au niveau d'un plan de clivage potentiel, les fibres s'opposent au clivage au fur et à mesure de l'augmentation de la contrainte. Le degré de résistance au cisaillement dépend pour beaucoup de la résistance à la traction des fibres. En outre, une bonne résistance à la compression peut être obtenue grâce à une armature de fibres, qui dépend à la fois de la quantité de fibres employée mais aussi de la résistance à la compression initiale de la terre, de la résistance à la traction initiale des fibres et de la friction interne entre les fibres et la terre. Quelques recherches laissent supposer qu'un pourrissement préalable de la paille dans la terre, durant quelques semaines, produit de l'acide lactique qui agit secondairement sur l'efficacité de la stabilisation.

RESULTATS

En résistance à la compression à sec, l'ajout de fibres telles que la paille p.e., permet une augmentation de résistance d'au moins 15 % par rapport à la résistance initiale du matériau sans fibres. Très exceptionnellement, les fibres n'améliorent guère cette résistance à la compression, dans le cas d'un matériau trop sableux p.e. Les blocs stabilisés aux fibres peuvent subir une grande déformation car ils absorbent une quantité d'énergie appliquée assez élevée. Ceci rend leur emploi particulièrement intéressant dans les zones à risque sismique. L'ajout de fibres modifie fondamentalement le comportement des blocs au-delà du point de rupture. Là où les matériaux non renforcés se brisent en morceaux, les blocs armés de fibres restent d'une pièce et continuent à gagner en résistance à la compression souvent au-delà du point de rupture des blocs non armés.

ASPECTS PRATIQUES

La résistance des blocs armés dépend de la quantité de fibres ajoutées mais il y a une quantité optimale à ne pas dépasser. Car une quantité trop importante allège trop la densité : le nombre de points de contacts entre les fibres et la terre, qui transmettent les déformations, est alors très réduit, diminuant la résistance du bloc. On commence à obtenir des résultats satisfaisants à partir d'un dosage à 4 % en volume. Des quantités de 20 à 30 kg/m³ sont très courantes. La paille est de préférence coupée en brins de 4 à 6 cm. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une distribution omnidirectionnelle des fibres dans la terre. De trop longs brins, parallèles, ne donnent pas de bons résultats ainsi que la concentration des fibres en des endroits spécifiques, ce qui peut arriver quand la quantité est trop élevée.

Les fibres peuvent être employées en combinaison avec d'autres stabilisants, avec le ciment, la chaux ou le bitume, p.e. Si l'on emploie de la paille avec du bitume, il faut d'abord ajouter à la terre le bitume, bien mélanger les 2 constituants puis ajouter ensuite la paille. Si l'on procède différemment, la paille et le bitume risquent de s'agglomérer indépendamment de la terre.

Les fibres incluses dans la terre se conservent sans détérioration à condition que le matériau soit sec. Si le matériau est en ambiance humide trop longtemps, il y a risque de putréfaction des fibres. Par contre, une alternance de cycle de mouillage et de séchage ne contribue pas à dégrader les fibres du moment qu'un séchage est assuré; des analyses faites sur des matériaux très anciens (adobes de l'Egypte pharaonique p.e.) le prouvent. Les fibres peuvent être attaquées par les rongeurs et les insectes nuisibles, termites p.e., particulièrement lorsqu'elles sont humides.

RECHERCHES

Très peu d'organismes étudient scientifiquement le comportement de la terre stabilisée aux fibres. Quelques recherches ont été faites à l'Université de Téhéran (Iran), au C.S.T.B. (France) et à l'Université I.F.E. (Nigéria).

VARIETES DE FIBRES

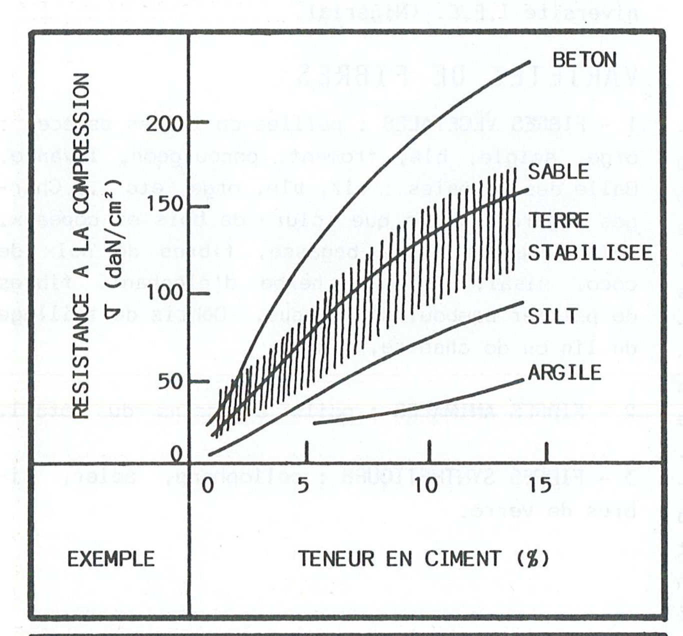
1 - FIBRES VEGETALES : pailles de toutes espèces : orge, seigle, blé, froment, escourgeon, lavande. Balle des céréales : riz, blé, orge, etc ... Charges légères telles que sciure de bois et copeaux. Foin, chanvre, mil, bagasse, fibres de noix de coco, sisal, manille, herbe d'éléphant, fibres de palmier bambou, d'hibiscus. Débris du teillage du lin ou de chanvre, etc ...

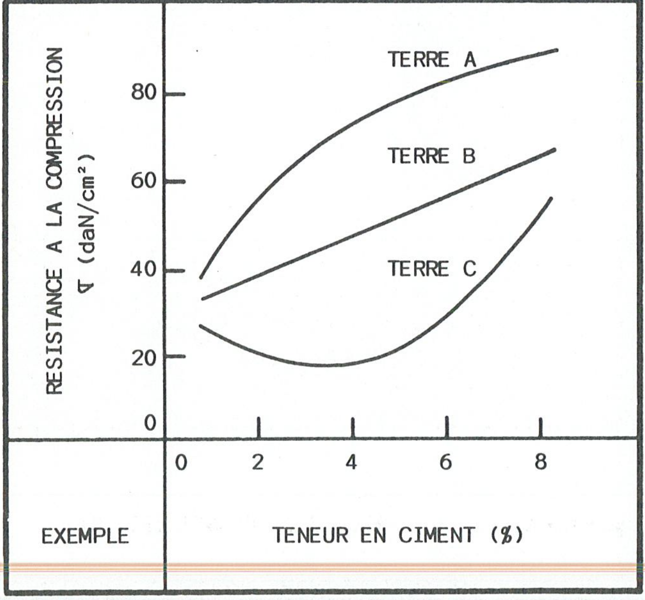
2 - FIBRES ANIMALES : poils et crins du bétail.

3 - FIBRES SYNTHETIQUES : cellophane, acier, fibres de verre.

BREVE HISTOIRE

Les premières tentatives de stabilisation au ciment, dans le domaine routier, ont lieu aux U.S.A. en 1915. Un certain J.H. Amies dépose 2 brevets pour ce type de matériau, en 1917 et 1920. La stabilisation au ciment, en construction de bâtiments est développée indépendamment en Allemagne, dès 1920. Aux U.S.A. à partir de 1935, le sol-ciment est de plus en plus employé: routes, pistes d'aérodromes. Depuis lors, dans le monde entier, on ne compte plus les applications de la stabilisation au ciment autant dans le domaine des travaux publics que dans celui du bâtiment. Ce matériau est aujourd'hui parfaitement maîtrisé.





MECANISMES DE STABILISATION

Dans la terre, le ciment hydraté réagit de 2 façons :

- Réaction avec lui-même : formation d'un mortier de ciment pur hydraté; réaction avec le squelette sableux : mécanisme classique du mortier.
- Réaction avec l'argile selon 3 phases :

1 - L'hydratation provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile. La chaux libérée pendant l'hydratation du ciment réagit aussitôt avec l'argile. La chaux est vite consommée et l'argile entame une dégradation.

2 - Progression de l'hydratation qui active la désagrégation des agglomérats d'argile; ceux-ci sont pénétrés en profondeur par les gels de ciment.

3 - Interpénétration intime des gels de ciment et des agglomérats argileux. L'hydratation persiste, mais plus lente.

On obtient en fait 3 structures mêlées :

- Une matrice inerte sableuse liée au ciment;
- Une matrice d'argile stabilisée;
- Une matrice de terre non stabilisée.

La stabilisation n'affecte pas tous les aggrégats. Une matrice stabilisée enveloppe des aggrégations composites de sable et d'argile.

EFFICACITE ET DOSAGE

La meilleure efficacité est obtenue par une compression à l'état humide. A l'état plastique, il faudrait 50 % de ciment en plus pour une même efficacité. Les meilleures résistances à la compression sont atteintes avec des graves et des sables plutôt qu'avec des silts et des argiles. Pour la terre, les dosages dépendent de sa texture et de sa structure, du mode de mise en oeuvre. 6 à 12 % donnent de bons résultats. Certaines terres n'exigent que 3 % et d'autres, au même dosage, se comportent moins bien que sans ciment. En général, il faut au moins 6 % de ciment pour obtenir des résultats satisfaisants. La résistance en compression reste très dépendante du dosage. Pour des conditions locales similaires, et pour une même épaisseur de mur (15 cm), l'économie en ciment d'une brique de terre stabilisée par rapport à un parpaing de ciment n'est pas toujours garantie. Une étude de coûts comparés préalable est conseillée.

PARAMETRES D'EFFICACITE

- TERRE : presque toutes les terres sont stabilisables au ciment. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des terres sableuses.

- MATIERES ORGANIQUES : elles sont reconnues comme nocives, surtout celles qui contiennent de l'acide nucléique, de l'acide tartrique ou du glucose : ralentissement de la prise du ciment, abaissement de la résistance. En règle générale, une teneur en matières organiques supérieure à 1 % constitue un risque et il ne faut pas utiliser une terre en contenant plus de 2 %.

- SULFATES : ils sont très néfastes, notamment le sulfate de calcium (anhydrite et gypse) que l'on rencontre fréquemment : destruction du ciment durci à l'intérieur de la terre-ciment, augmentation de la sensibilité à l'humidité des argiles. Une étude spécifique pour les terres contenant plus de 2 à 3 % de sulfates est indispensable.

- OXYDES ET HYDROXYDES METALLIQUES : essentiellement des oxydes de fer et d'aluminium dont la teneur est rarement supérieure à 5 % et qui n'ont alors que peu d'effet. Dans les terres latéritiques, on a pu constater une efficacité de la stabilisation avec peu de ciment. Il peut s'agir de réactions de type pouzzolanique entre la latérite et la chaux contenue dans le ciment.

- EAU : on rejettera en principe les eaux chargées en matières organiques et les eaux salées: risques d'efflorescences. Les eaux riches en sulfates peuvent être défavorables.

EFFETS

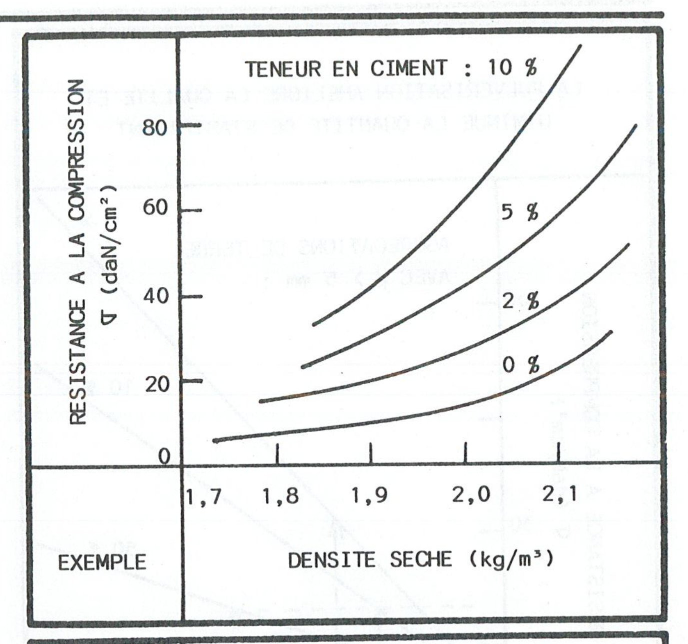
- DENSITE SECHE : elle diminue pour les terres qui se compactent bien; elle augmente pour les terres qui se compactent médiocrement.

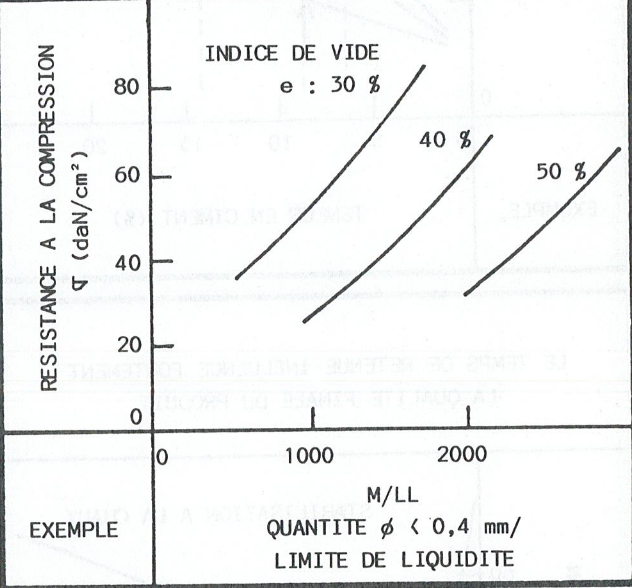
- RESISTANCE A LA COMPRESSION SECHE ET HUMIDE : l'influence du ciment sur ce paramètre est fonction de la densité sèche, de l'indice des vides : $e = (\gamma S - \gamma d)/\gamma d$, de Ip et de LL et de M (proportion d'éléments de $\phi < 0{,}4$ mm en %) d'après Etudes de l'E.I.E.R. de Ouagadougou (Haute-Volta).

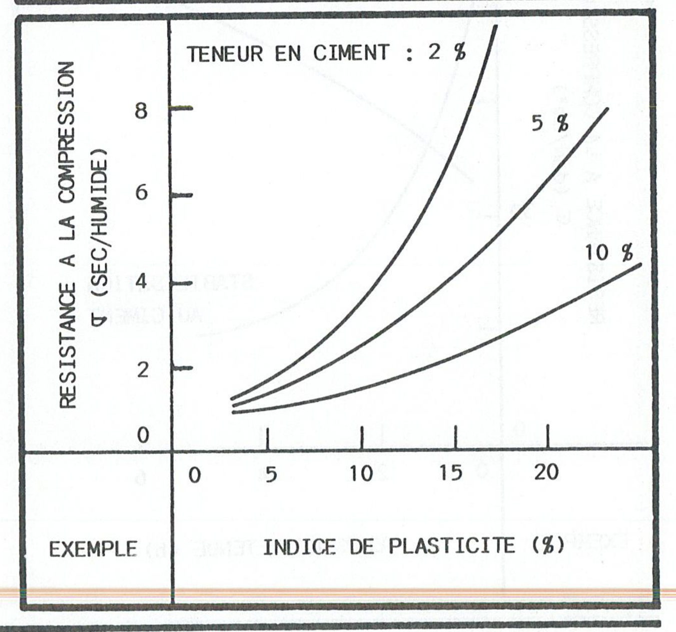
- RESISTANCE A LA TRACTION : elle varie de 1/5 à parfois 1/10 de la résistance à la compression.

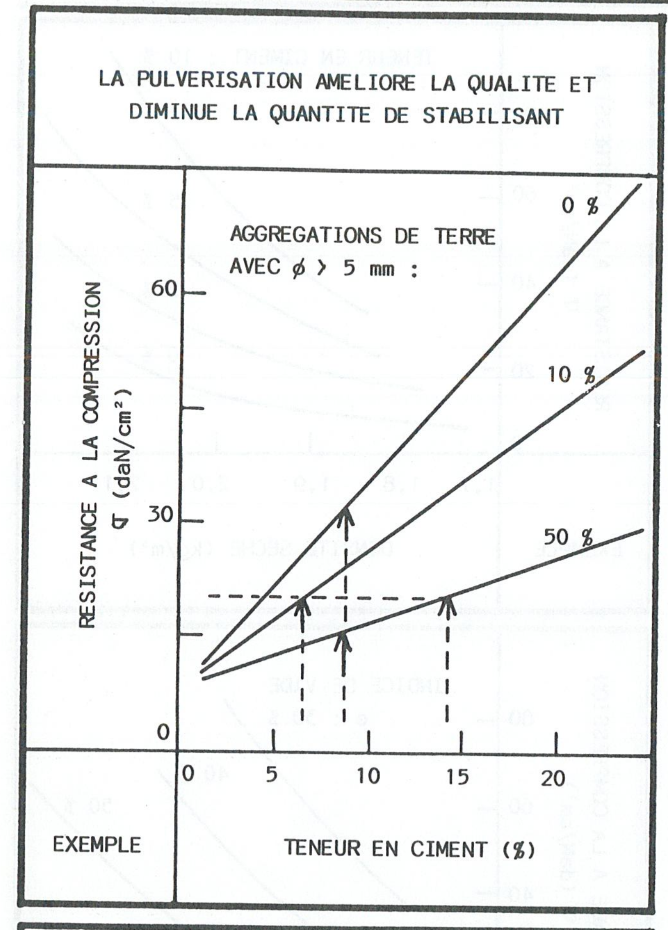
- VARIATIONS DIMENSIONNELLES : la stabilisation au ciment diminue l'importance du retrait au séchage et du gonflement à l'humidification.

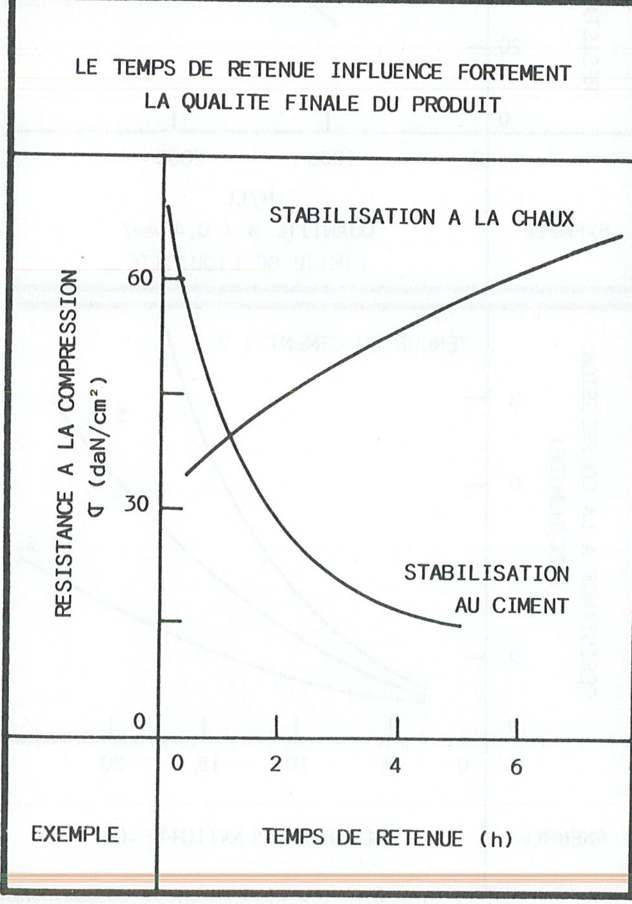
- EROSION : amélioration de la résistance des terres à l'érosion sous l'action de la pluie surtout lorsque la terre contient de gros grains.











CIMENTS

Les ciments Portland ordinaires ou de classe analogue conviennent très bien. Il n'est pas utile d'employer des ciments à haute résistance qui n'apportent pas d'amélioration particulière et qui coûtent plus cher. De plus, les ciments à haute résistance s'éventent plus facilement, ce qui exclut leur emploi sur des chantiers éloignés des unités de production. On préfèrera donc, par ordre de préférence, l'emploi des ciments Portland de classe 250 ou 325 (CPA 250 - CPA 350); les CPA avec constituants secondaires: laitiers (CPAL), cendres (CPAC) et pouzzolanes (CPAZ) peuvent être également employés bien que les CPAL et les CPAC ne soient en général disponibles qu'à proximité des unités de production sidérurgique (CPAL) et des centrales thermiques (CPAC). Par contre, les ciments trop riches en constituants secondaires, très délicats quant à la cure, seront rejetés : ciment Portland de fer (CPF), ciments de hauts-fourneaux (CHF), ciments métallurgiques mixtes (CMM) et ciments de laitier au clinker (CLK).

ADDITIFS

Certains produits, ajoutés en petites quantités à la terre-ciment pendant le malaxage peuvent. en améliorer certaines propriétés.

1 - Quelques produits organiques (acétate d'amine, mélamine, aniline) ou minéraux (chlorure de fer) réduisent la sensibilité à l'eau de certaines terres.

2 - La chaux, à raison de 2 %, peut réduire l'influence néfaste des matières organiques, tout comme le chlorure de calcium (0,3 à 2 %) qui, en outre, accélère la prise du ciment. La chaux peut aussi servir à modifier la plasticité de la terre et à limiter la formation de modules.

3 - Les additifs sodiques augmentent la réactivité de la terre et peuvent provoquer des réactions de cimentation complémentaires à celles du ciment avec les particules de la terre. NaOH (soude, à raison de 20 à 40 g/litre d'eau de gachâge); $NaSO4$ (0,5 à 1,1 %); $Na2CO3$ (1 %); $Na2S102$ (1 %).

4 - Les bitumes, en émulsion ou en cut-back, à raison de 2 à 4 %, permettent une imperméabilisation de la terre-ciment.

MISE EN OEUVRE

1 - PULVERISATION

La qualité d'une stabilisation au ciment exige un mélange intime des constituants. Les éléments fins ne doivent pas trop s'agglomérer en modules dont la grosseur n'excèdera pas 10 mm. La présence de 50 % de modules de grosseur > 5 mm peut réduire la résistance à la compression de moitié.

2 - MALAXAGE

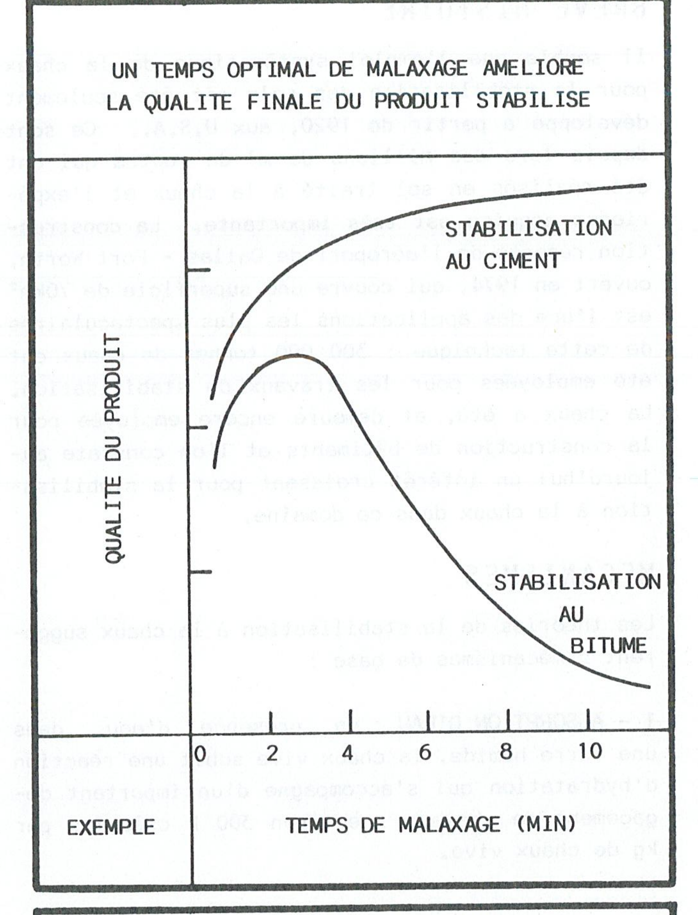
La bonne répartition du ciment et l'homogénéité du matériau stabilisé sont conditionnées par le malaxage. Il importe de disposer d'une terre sèche pour réunir les meilleures conditions de malaxage. Dans les régions humides, cela peut nécessiter un séchage préalable de la terre. Une trituration peut accélérer le séchage et aider au brisage des mottes. L'eau nécessaire au mélange ne sera ajoutée qu'en fin de malaxage, après une phase nécessaire de malaxage à sec.

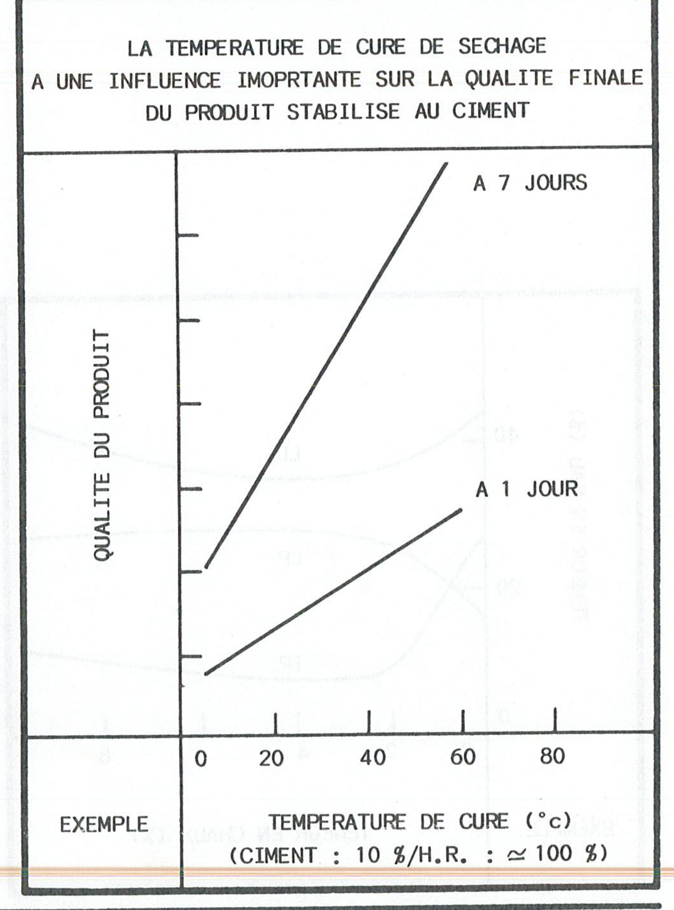
3 - MOULAGE, MISE EN FORME

Le matériau sera compacté juste après le malaxage, avant le début de la prise du ciment et à une teneur en eau contrôlée, proche de l'optimum. Un écart de 4 % de teneur en eau,en plus ou en moins, réduira très sensiblement la qualité du matériau. En règle générale, les terres riches en argile seront compactées du côté humide de la T.E.O. et les terres riches en sables du côté sec de la T.E.O.

SECHAGE

La résistance d'une terre-ciment croît avec l'âge. 14 jours de cure de séchage sont absolument indispensables, 28 jours valent mieux. Pendant cette période, le matériau sera maintenu en ambiance humide, à l'abri du soleil et en prenant garde au vent : risque de dessèchement trop rapide en surface pouvant provoquer la formation de fissures de retrait. Les matériaux seront séchés en configuration compacte, humidifiés par aspersion ou, recouverts d'une feuille de plastique qui maintient une élévation des températures tout en donnant une humidité relative proche des 100 %. La durée de cette cure de séchage humide augmentera la résistance du matériau.





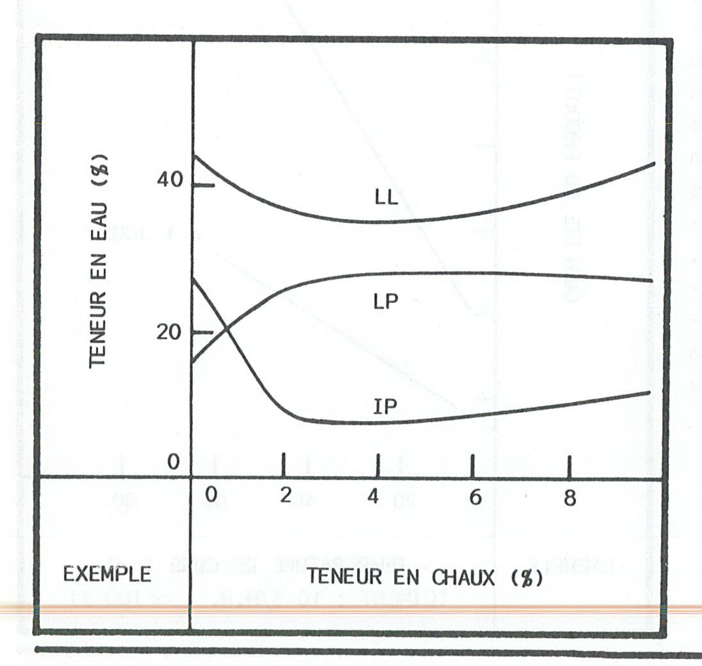
BREVE HISTOIRE

Il semble que l'emploi systématique de la chaux pour la stabilisation des sols ait été seulement développé à partir de 1920, aux U.S.A.. Ce sont depuis lors des millions de m² de routes qui ont été réalisés en sol traité à la chaux et l'expérience acquise est très importante. La construction récente de l'aéroport de Dallas - Fort Worth, ouvert en 1974, qui couvre une superficie de 70km² est l'une des applications les plus spectaculaires de cette technique : 300 000 tonnes de chaux ont été employées pour les travaux de stabilisation. La chaux a été, et demeure encore employée pour la construction de bâtiments et l'on constate aujourd'hui un intérêt croissant pour la stabilisation à la chaux dans ce domaine.

MECANISMES

Les théories de la stabilisation à la chaux suggèrent 5 mécanismes de base :

1 - ABSORPTION D'EAU : en présence d'eau, dans une terre humide, la chaux vive subit une réaction d'hydratation qui s'accompagne d'un important dégagement de chaleur : environ 300 k calories par kg de chaux vive.



2 - ECHANGE CATIONIQUE : lorsque l'on ajoute de la chaux à une terre humidifiée, celle-ci est saturée d'ions de calcium. Apparaît alors un phénomène d'échange de cations : les ions de calcium se substituent aux cations échangeables du complexe de la terre tels que magnésium, sodium, potassium et hydrogène. L'importance de cet échange cationique dépend de la quantité de cations échangeables présents dans la capacité totale d'échange cationique de la terre.

3 - FLOCULATION ET AGGLOMERATION : du fait de l'échange de cations et de l'augmentation de la quantité d'électrolytes dans l'eau intersticielle, les particules de la terre floculent et s'agglomèrent. Il y a augmentation de la taille des aggrégats de la fraction fine. La texture et la structure ont changé.

4 - CARBONATATION : la chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former des ciments carbonatés médiocres. Cette réaction consomme une partie de la chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques.

5 - REACTION POUZZOLANIQUE : c'est de loin le mécanisme le plus important qui influence principalement la stabilisation à la chaux. Les propriétés de résistance du matériau résultent pour l'essentiel d'une dissolution des minéraux argileux dans un environnement alkalin produit par la chaux et de la recombinaison de la silice et de l'alumine des argiles avec le calcium pour former des silicates complexes d'aluminium et de calcium qui cimente les grains entre eux. La chaux doit être ajoutée à la terre en quantité suffisante afin de produire et de maintenir un pH élevé nécessaire à la dissolution des minéraux argileux et pour une période suffisante qui permettra une réaction de stabilisation effective.

EFFICACITE ET DOSAGE

Pour un ajout à la terre de 1 % de chaux vive, la réaction exothermique d'hydratation assèche la terre en évacuant environ 0,5 à 1 % d'eau. 2 à 3 % de chaux ajoutée provoquent immédiatement une diminution de la plasticité de la terre et un brisage des mottes; cette réaction est appelée point de fixation de la chaux. Pour des stabilisations ordinaires, on pratique en général des dosages de 6 à 12 % équivalents à ceux pratiqués avec le ciment, mais on notera que pour la chaux, il existe une quantité optimale pour chaque terre.

Des procédés industriels sophistiqués emploient de hautes pressions et un traitement à la vapeur en autoclave avec des dosages allant jusqu'à 20 %. Les produits obtenus sont similaires à ceux de l'industrie silico-calcaire. La stabilisation à la chaux est particulièrement bien adaptée au procédé de moulage par compression.

PARAMETRES D'EFFICACITE

- **TERRES** : elles doivent contenir une fraction argileuse non négligeable. Les résultats varient selon la nature des minéraux argileux et sont bons avec ceux riches en silicates d'alumine, en silice, en hydroxydes de fer. Les pouzzolanes naturelles réagissent vite et bien avec la chaux.

- **MATIERES ORGANIQUES** : elles peuvent bloquer les échanges ioniques dans les terres argileuses sans pour autant bloquer la réaction pouzzolanique. Des terres en contenant jusqu'à 20 % peuvent être stabilisées à la chaux mais avec soin.

- **SULFATES** : les sulfates de calcium sont moins néfastes que ceux de magnésium, à l'état sec. A l'état humide, les sulfates sont néfastes.

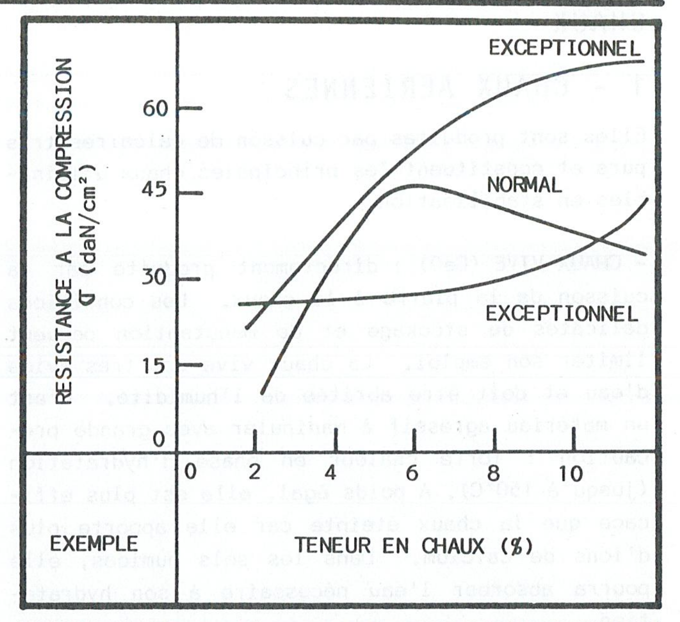
EFFETS

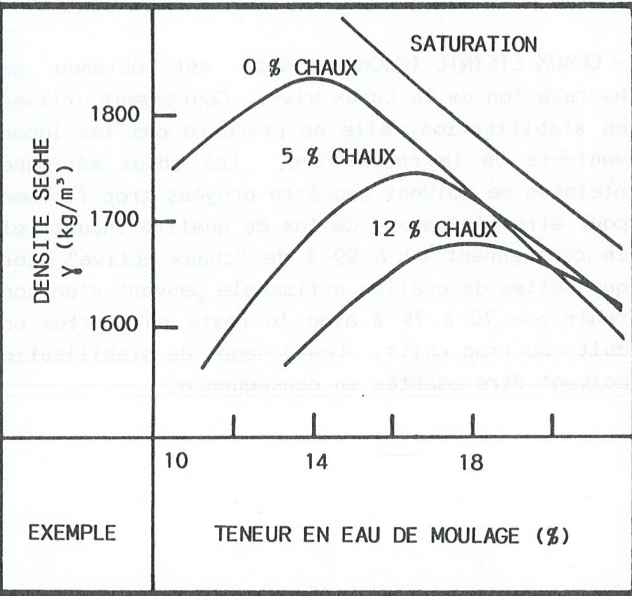
- **DENSITE SECHE** : pour une compression donnée, la chaux réduit la γd max. et élève la T.E.O., du fait de la floculation.

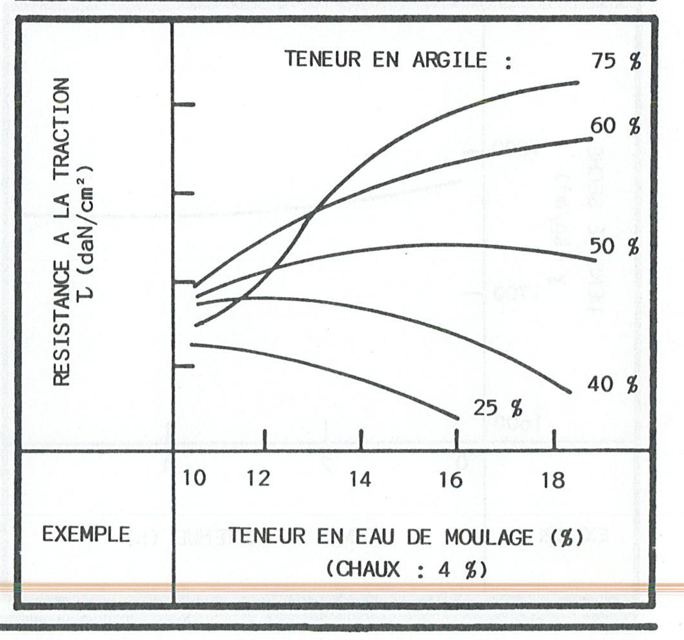
- **RESISTANCE A LA COMPRESSION** : le dosage optimal de chaux doit être précisé par des essais préalables. Tc tend à croître avec l'âge du produit. On obtient facilement des Tc de 20 à 50 daN/cm² et 200 à 400 daN/cm² avec des procédés industriels.

- **RESISTANCE A LA TRACTION** : elle est très influencée par la quantité et la qualité des argiles contenues dans la terre, qui réagiront avec la chaux.

- **VARIATIONS DIMENSIONNELLES** : 1 à 2 % de chaux seulement peuvent réduire le retrait de 8 à 10 % jusqu'à 1 % et supprimer le gonflement.







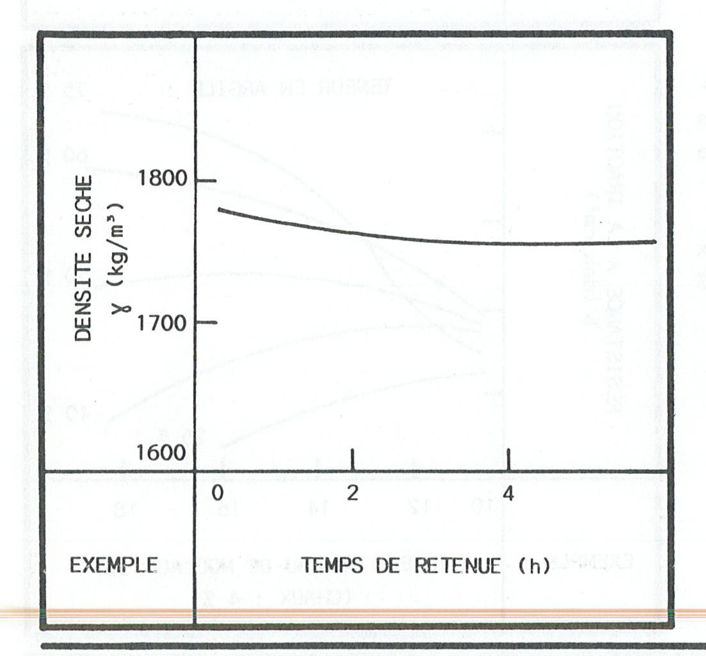
CHAUX

1 - CHAUX AERIENNES

Elles sont produites par cuisson de calcaires très purs et constituent les principales chaux utilisables en stabilisation.

- CHAUX VIVE (CaO) : directement produite par la cuisson de la pierre à la chaux. Les conditions délicates de stockage et de manutention peuvent limiter son emploi. La chaux vive est très avide d'eau et doit être abritée de l'humidité. C'est un matériau agressif à manipuler avec grande précaution : forte chaleur en phase d'hydratation (jusqu'à 150°C). A poids égal, elle est plus efficace que la chaux éteinte car elle apporte plus d'ions de calcium. Dans les sols humides, elle pourra absorber l'eau nécessaire à son hydratation.

- CHAUX ETEINTE (CaOH)2 : elle est obtenue par hydratation de la chaux vive. Couramment utilisée en stabilisation, elle ne présente pas les inconvénients de la chaux vive. Les chaux aériennes éteintes ne doivent pas être broyées trop finement pour être efficaces. Celles de qualité industrielle contiennent 90 à 99 % de "chaux active" alors que celles de qualité artisanale peuvent n'en contenir que 70 à 75 % avec le reste en inertes non cuits ou trop cuits. Les dosages de stabilisation doivent être adaptés en conséquence.



2 - CHAUX HYDRAULIQUES

Elles se rapprochent des ciments. Leur emploi n'est envisageable que si l'on ne dispose pas d'autres qualités de chaux. Les chaux hydrauliques naturelles (XHN) sont plus efficaces en stabilisation que les chaux hydrauliques artificielles (XHA).

3 - CHAUX AGRICOLES

Elles sont utilisées pour l'amendement des terres agricoles et n'ont généralement aucun effet stabilisant.

ADDITIFS

Certains additifs mêlés à la chaux en petite quantité peuvent avoir des effets spéciaux.

1 - Augmenter la réactivité de la terre :
. La soude caustique : NaOH.
. Le sulfate de sodium : SO4Na2.
. Le métasilicate de sodium : S1O3Na2(9H2O).
. Le carbonate de sodium : CO3Na2.
. L'aluminate de sodium : AlO2Na.
Leur dosage varie de 1/4 à 2 mol.g/litre d'eau de compactage.

2 - Augmenter la résistance à la compression :
. Ciment Portland avec un dosage jusqu'à 100 % de chaux.

3 - Augmenter l'efficacité de la stabilisation pour des terres sablo-limoneuses et réduire le gonflement dû à la chaux vive : le sulfate de magnésium (SO4Mg) dosé à environ 1/4 du poids de chaux.

4 - Hydrofuger la terre traitée :
. Sulfate de potassium : SO4K2.
. Produits bitumeux.
. Autres hydrofuges.

MISE EN OEUVRE

1 - PULVERISATION

Cette opération est importante et doit être effectuée avec grand soin. Plus l'argile sera finement brisée, plus la chaux sera active dans son action d'attaque de l'argile. L'opération peut être difficile car l'argile présente une forte cohésion. Une terre trop humide peut être asséchée et brisée avec de la chaux vive. La stabilisation sera efficace si au moins 50 % des agglomérats argileux sont broyés au ⌀ < 5 mm.

2 - MALAXAGE

Il devra être très soigné pour assurer un mélange intime de la terre et de la chaux. Pour les terres très plastiques, on pourra procéder en 2 étapes, espacées de 1 à 2 jours,qui permettront à la chaux d'ameublir les mottes; ce procédé en 2 étapes peut néanmoins réduire l'action de la chaux sur la résistance. On peut contrôler l'homogénéité du mélange en appréciant l'unité de sa teinte, aucune traînée de chaux non incorporée dans la terre ne devront pas apparaître.

3 - TEMPS DE RETENUE

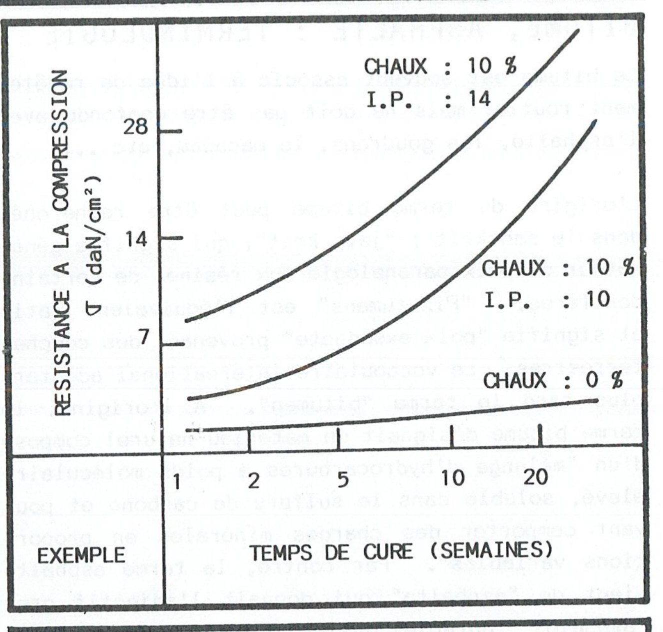
Si la mise en oeuvre se fait par voie humide, le mélange peut être laissé avantageusement au repos après le malaxage. On attendra au moins 2 h pour des dosages en chaux supérieurs au point de fixation de la chaux; 8 à 16 h sont préférables. L'effet est négligeable sur la densité sèche mais les résistances obtenues sont supérieures.
Si l'on procède par voie plastique, on a intérêt à laisser réagir le mélange de terre et de chaux vive ou éteinte pendant plusieurs semaines. C'est notamment le cas pour les enduits qui deviennent plus onctueux et collants.

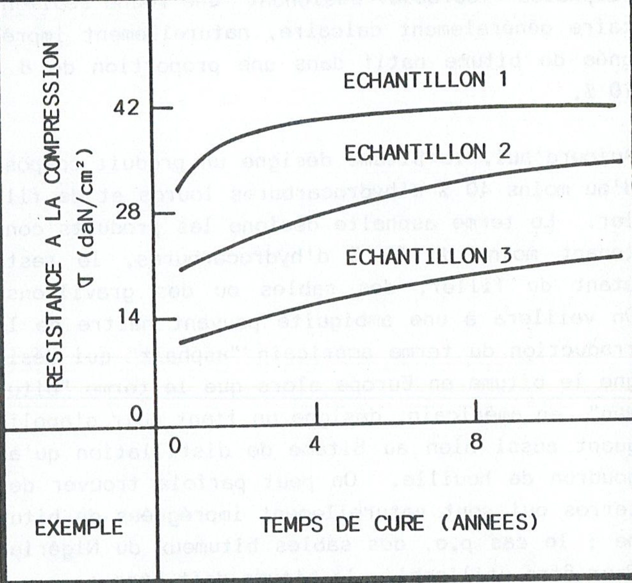
4 - COMPRESSION

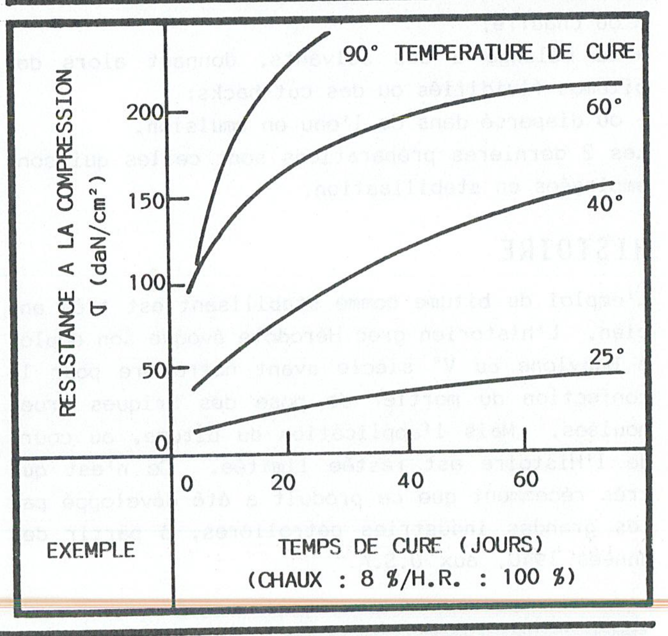
La densité sèche est très sensible à la quantité de compactage, surtout pour des dosages en chaux élevés. La teneur en eau de compactage sera proche de l'optimum, du côté humide, après un temps de retenue suffisant du mélange (plus long pour les dosages élevés). La réaction exothermique provoquée par la chaux vive consomme près de 1 % de teneur en eau par % de chaux vive ajoutée. On corrigera donc la teneur en eau pour approcher la T.E.O. lors de la 2ème étape de malaxage.

5 - CURE DE SECHAGE

On constate une augmentation de la résistance à la compression avec l'allongement du délai de cure. Ce phénomène s'étend sur plusieurs semaines et persiste pendant de longs mois, évoluant d'autant mieux dans une ambiance chaude et humide. Les produits de terre stabilisés à la chaux peuvent être très avantageusement exposés à de hautes températures (> 60°C). Une cure de séchage sous le soleil et sous un film de plastique ou sous un tunnel de tôles permet cette élévation de la température et de l'humidité relative. Des recherches menées à l'Université du Danemark ont montré que l'on obtient de très bons produits avec un séchage de 24 h en autoclave à 60-97°C et à 100 % de H.R.







BITUME, ASPHALTE : TERMINOLOGIE

Le bitume est souvent associé à l'idée de revêtement routier mais ne doit pas être confondu avec l'asphalte, les goudrons, le macadam, etc ...

L'origine du terme bitume peut être recherchée dans le sanskrit : "jatu krit", qui signifie générateur de poix, paranalogie aux résines de certains conifères. "Pix-tumens" est l'équivalent latin et signifie "poix exsudante" provenant des couches terrestres. Le vocabulaire international adoptera plus tard le terme "bitumen". A l'origine, le terme bitume désignait un matériau naturel composé d'un "mélange d'hydrocarbures à poids moléculaire élevé, soluble dans le sulfure de carbone et pouvant comporter des charges minérales en proportions variables". Par contre, le terme asphalte vient de "asphalta" qui donnait l'adjectif grec "asphales" (durable) désignant "une roche sédimentaire généralement calcaire, naturellement imprégnée de bitume natif dans une proportion de 8 à 10 %.

Aujourd'hui, le bitume désigne un produit composé d'au moins 40 % d'hydrocarbures lourds et de filler. Le terme asphalte désigne les produits contenant moins de 20 % d'hydrocarbures, le reste étant du filler, des sables ou des gravillons. On veillera à une ambiguité pouvant naître de la traduction du terme américain "asphalt" qui désigne le bitume en Europe alors que le terme "bitumen", en américain, désigne un liant noir s'appliquant aussi bien au bitume de distillation qu'au goudron de houille. On peut parfois trouver des terres qui sont naturellement imprégnées de bitume : le cas p.e. des sables bitumeux du Nigéria. Pour être utilisable, le bitume doit être :
- ou chauffé;
- ou mélangé à des solvants, donnant alors des bitumes fluidifiés ou des cut-backs;
- ou dispersé dans de l'eau en émulsion.

Les 2 dernières préparations sont celles qui sont employées en stabilisation.

HISTOIRE

L'emploi du bitume comme stabilisant est très ancien. L'historien grec Hérodote évoque son emploi à Babylone au V° siècle avant notre ère pour la confection du mortier de pose des briques crues moulées. Mais l'application du bitume, au cours de l'Histoire est restée limitée. Ce n'est que très récemment que ce produit a été développé par les grandes industries pétrolières, à partir des années 1940, aux U.S.A. Des briques stabilisées furent commercialisées sous le nom de Bitudobe ou Asphadobe. Le domaine des travaux publics exploitait ce procédé de stabilisation pour la construction de routes. En Algérie p.e., près de 28 000 km de routes ont été réalisées avec cette technique. Aujourd'hui, aux U.S.A., l'adobe stabilisé au bitume est un matériau de construction très développé ainsi qu'en Amérique centrale et latine. Des tentatives récentes de transfert de cette technologie en Afrique n'ont pas connu de succès même dans les pays producteurs de pétrole. L'emploi du bitume, qui était considéré il y a quelques années comme un produit miracle capable de résoudre définitivement les problèmes de stabilisation, est aujourd'hui en régression du fait de la hausse des produits pétroliers.

MECANISMES

Les cut-backs ou les émulsions bitumineuses se présentent sous la forme de globules microscopiques en suspension dans un solvant ou dans l'eau. Le stabilisant est mélangé à la terre puis, lorsque le solvant ou l'eau s'évapore, les globules de bitume s'étirent en films solides très fins qui adhèrent aux particules de la terre et les enrobent. Le bitume améliore la résistance de la terre à l'eau (moins d'absorption des argiles) et peut apporter une cohésion aux sols naturellement peu cohérents, en jouant le rôle de liant.

EFFICACITE ET DOSAGE

Pour obtenir une distribution homogène du bitume dans la terre, il est préférable d'utiliser un procédé qui réclame beaucoup d'eau. C'est donc la technique de l'adobe qui convient le mieux. Les dosages classiques sont de 2 à 3 %, pouvant aller jusqu'à 8 %. Ces dosages varient suivant la granularité de la terre car l'efficacité de la stabilisation au bitume est liée à l'enrobage de la surface spécifique des particules. Ces valeurs de dosage concernent le bitume non dilué dans un solvant ou dans une solution aqueuse. Le bitume n'affecte que très légèrement la teinte du matériau et ne restitue aucune odeur caractérisée après le séchage des produits stabilisés.

PARAMETRES D'EFFICACITE

- TERRE : la stabilisation au bitume est le plus efficace pour des terres sableuses ou limoneuses. Elle ne convient pas bien pour les terres fines des régions arides dont le pH et la teneur en sels dissous sont élevés.

- MATIERES ORGANIQUES ET SULFATES : leur présence dans la terre gêne l'efficacité de la stabilisation au bitume car leur adhérence aux particules nuit à l'adhérence du bitume. Les matières organiques acides (terres de fôret p.e.) sont très néfastes. Les matières organiques neutres et alkalines des régions arides et semi-arides ne sont pas particulièrement nuisibles.

- SELS : les sels minéraux sont très néfastes. Ils peuvent être neutralisés en ajoutant 1 % de ciment. Dans la stabilisation au bitume industrielle, on n'accepte pas plus de 0,2 % de sels mais on peut parfois accepter jusqu'à 6 % de chlorure de sodium (NaCl).

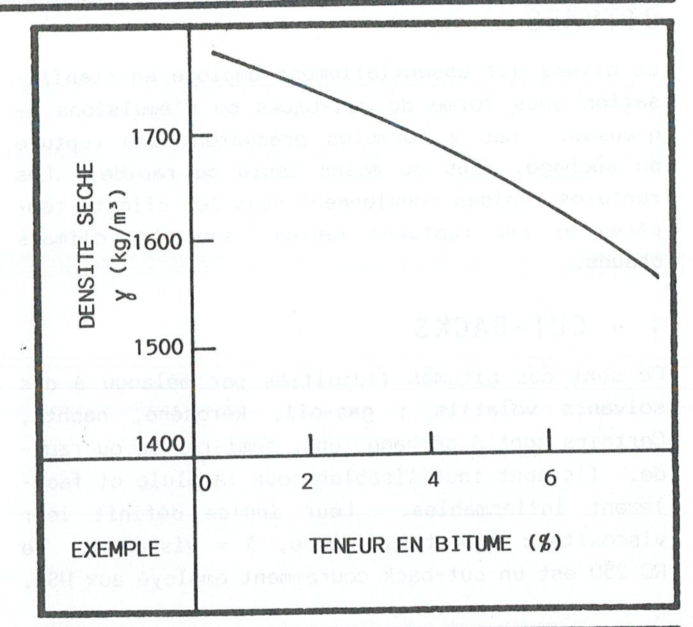
EFFETS

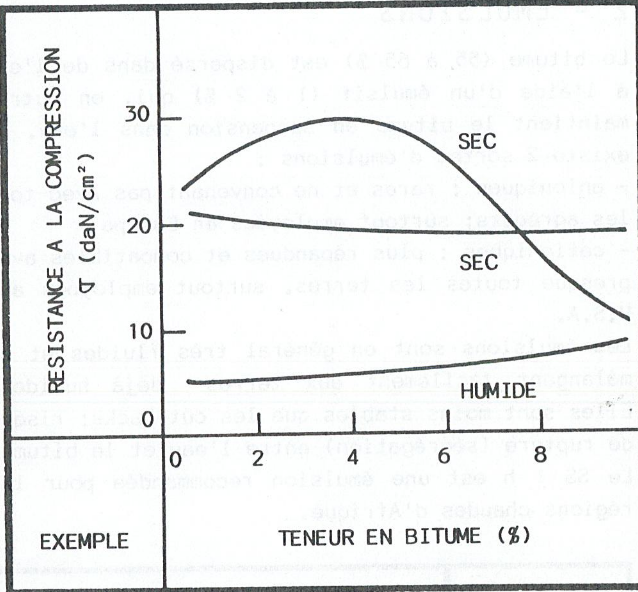
- DENSITE SECHE : le bitume provoque une baisse de la densité et accroît la teneur optimale en liquide (eau + bitume).

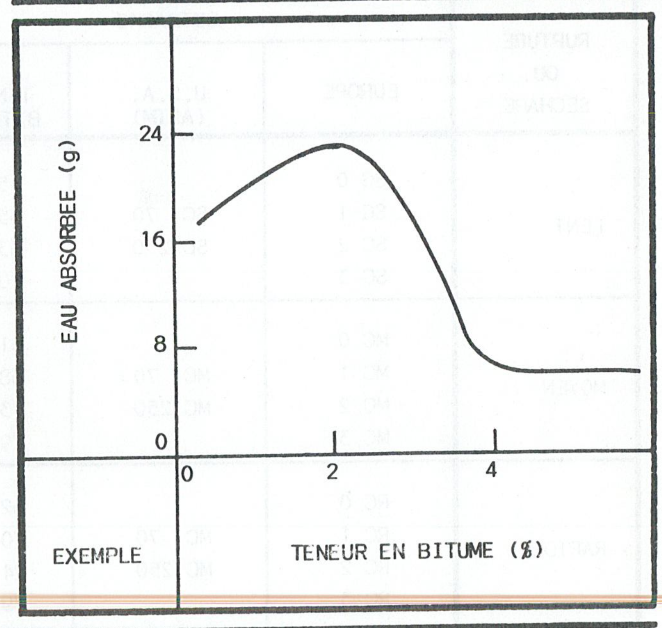
- RESISTANCE A LA COMPRESSION : à l'état sec, elle augmente avec la proportion de bitume jusqu'à un certain seuil au-delà duquel elle chute dangereusement car le bitume en excès joue le rôle de lubrifiant, une fois l'enrobage idéal réalisé. A l'état humide, la résistance croît régulièrement avec la quantité de bitume, indépendamment de la résistance à sec.

- ABSORPTION : elle est fonction de la teneur en eau durant le malaxage et devient très faible à partir d'un certain seuil qu'il convient de déterminer. Après un séchage de quelques jours, l'absorption d'eau reste stationnaire dans le temps.

- GONFLEMENT : il est fonction de la teneur en liquide au malaxage. Plus le malaxage est effectué à l'état liquide, moins on observe de gonflement.







BITUMES

Le bitume est essentiellement employé en stabilisation sous forme de cut-backs ou d'émulsions aqueuses. Ces 2 formules présentent une rupture au séchage, plus ou moins lente ou rapide. Les ruptures rapides conviennent sous les climats tempérés et les ruptures lentes sous les climats chauds.

1 - CUT-BACKS

Ce sont des bitumes fluidifiés par mélange à des solvants volatils : gas-oil, kérosène, naphta. Certains sont à séchage lent, semi-rapide ou rapide. Ils sont inutilisables sous la pluie et facilement inflammables. Leur indice définit leur viscosité : 0 = très fluide, 3 = visqueux. Le RC 250 est un cut-back couramment employé aux USA.

2 - EMULSIONS

Le bitume (55 à 65 %) est dispersé dans de l'eau à l'aide d'un émulsif (1 à 2 %) qui, en outre, maintient le bitume en suspension dans l'eau. Il existe 2 sortes d'émulsions :

- anioniques : rares et ne convenant pas avec tous les agrégats; surtout employées en Europe.
- cationiques : plus répandues et compatibles avec presque toutes les terres, surtout employées aux U.S.A.

Les émulsions sont en général très fluides et se mélangent facilement aux terres déjà humides. Elles sont moins stables que les cut-backs: risque de rupture (ségrégation) entre l'eau et le bitume. Le SS 1 h est une émulsion recommandée pour les régions chaudes d'Afrique.

ADDITIFS

Ils ont plusieurs actions complémentaires :

1 - Neutraliser les sels : le ciment, dosé de 1 à 2 % du poids de la terre.

2 - Floculer la terre : la chaux, dosée de 1 à 2 % du poids de la terre.

3 - Favoriser un meilleur surfaçage des grains par le bitume : les amines quaternaires, dosées à 0,6 % du poids de cut-back ou à 0,01 % du poids de la terre.

4 - Améliorer l'adhérence du bitume sur les grains :les amines quaternaires, dosées à 0,03 % du poids de la terre.

5 - Augmenter la rigidité des films de bitume : les cires, dosées à 0,07 % du poids de la terre ou à 1 % du poids du bitume.

6 - Elever la résistance à la compression sèche et humide : l'anhydride phosphorique (P_2O_5), dosé à 2 % du poids de la terre.

MISE EN OEUVRE

1 - MALAXAGE

Cette étape conditionne beaucoup l'efficacité de la stabilisation au bitume. Un excès de malaxage peut augmenter l'absorption d'eau après séchage

RUPTURE OU SECHAGE	CUTBACKS			EMULSIONS		
	EUROPE	U.S.A. (ASTM)	TENEUR EN BITUME (%)	ANIONIQUES (ASTM)	CATIONIQUES (ASTM)	VISCOSITE
LENT	SC 0 SC 1 SC 2 SC 3	SC 70 SC 250	45 - 50 55 - 61 63 - 70 70 - 75	SS 1 SS 1 h	CSS 1 CSS 1 h	FLUIDE VISQUEUX
MOYEN	MC 0 MC 1 MC 2 MC 3	MC 70 MC 250	61 - 65 68 - 72 73 - 77 79 - 82	MS 2 MS 2 h	CMS 2 CMS 2 h	FLUIDE VISQUEUX
RAPIDE	RC 0 RC 1 RC 2 RC 3	MC 70 MC 250	62 - 65 70 - 73 74 - 78 79 - 83	RS 1 RS 2	CRS 1 CRS 2	FLUIDE VISQUEUX

du fait d'une rupture prématurée de l'émulsion. Si le malaxage se fait à l'état liquide ou plastique (adobe, bauge, mortier, enduit),il ne présente aucune difficulté.

Par contre, si la terre sera compactée : pisé, blocs comprimés p.e., le malaxage se fera à une teneur en eau très proche de l'optimum. Attention aux terres déjà humides pour ne pas rajouter du stabilisant (eau + bitume) en excès. Le malaxage est plus difficile à la T.E.O. : la résistance humide et l'imperméabilité pourront être moins bonnes mais le compactage et le démoulage seront plus faciles : rôle lubrifiant du bitume.

Il est préférable d'ajouter le bitume à une petite quantité de terre, puis de mélanger cette petite quantité au reste de la terre. Si l'on doit ajouter du sable à la terre, on ajoutera le bitume au sable, puis ce sable stabilisé au reste de la terre (surtout pour les cut-backs). Pour les émulsions, on les diluera dans l'eau de gâchage. Ces méthodes de mélange sont très importantes pour de faibles dosages (p.e. 2 %) en bitume.

2 - TEMPS DE RETENUE

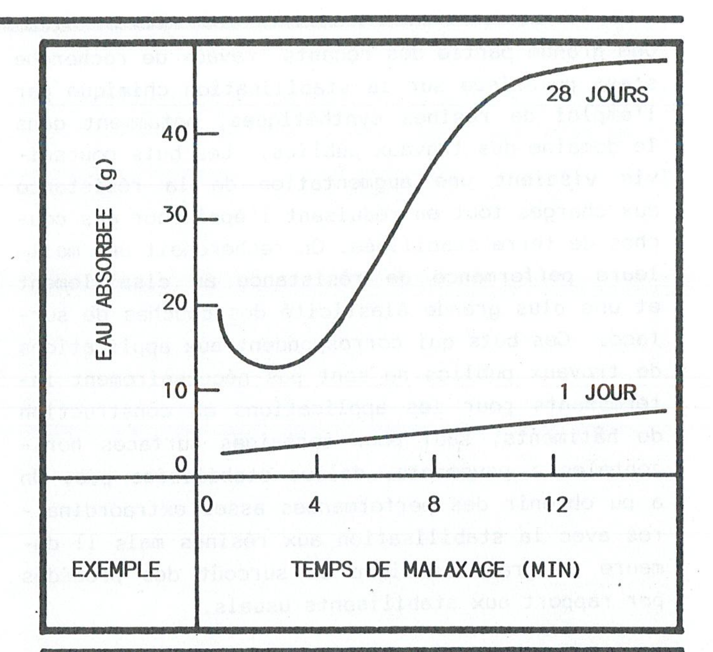
Si l'on emploie des stabilisants bitumineux à rupture lente ou semi-rapide, un délai d'attente est possible entre le malaxage et le moulage. Pour les produits à rupture rapide, les opérations se suivront sans tarder.

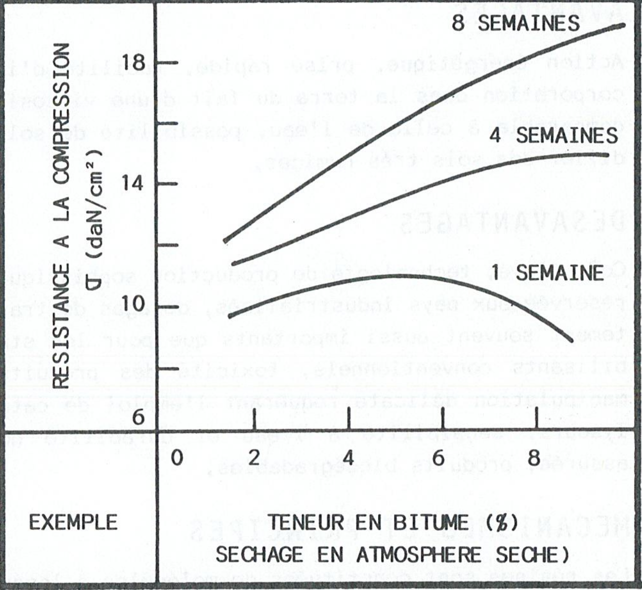
3 - COMPACTAGE

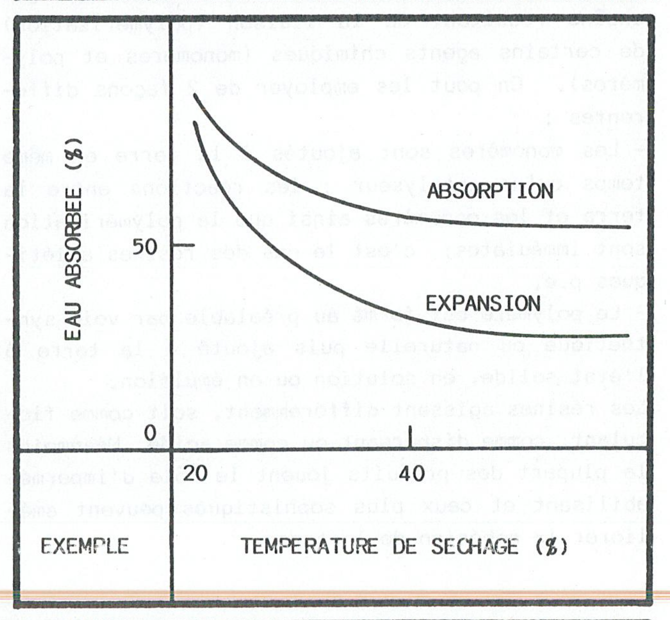
20 à 40 daN/cm² sont suffisants et confèrent au matériau une structure assez ouverte pour faciliter l'évaporation des solvants volatiles tout en garantissant une bonne densité sèche. Au démoulage le bitume jouant un rôle de lubrifiant, les blocs auront une belle apparence : arêtes vives.

4 - CURE DE SECHAGE

Les cut-backs et émulsions à rupture rapide écourtent le délai de séchage. Il est préférable de faire sécher les matériaux stabilisés au bitume à l'air sec plutôt qu'en ambiance humide. Les résistances à la compression obtenues sont fonction du dosage en bitume et du délai de séchage. Ces deux paramètres seront précisés par des essais préalables pour en connaître les valeurs optimales. La perte en éléments volatiles est supérieure pour une cure assez longue et une température élevée qui a des effets bénéfiques sur l'absorption et l'expansion. Mais au-delà de 40°C on n'observe plus d'améliorations.







Une grande partie des récents travaux de recherche s'est polarisée sur la stabilisation chimique par l'emploi de résines synthétiques, notamment dans le domaine des travaux publics. Les buts poursuivis visaient une augmentation de la résistance aux charges tout en réduisant l'épaisseur des couches de terre stabilisée. On recherchait une meilleure performance de résistance au cisaillement et une plus grande élasticité des couches de surface. Ces buts qui correspondent aux applications de travaux publics ne sont pas nécessairement intéressants pour les applications en construction de bâtiments, sauf pour certaines surfaces horizontales : pavements, dalles stabilisées p.e. On a pu obtenir des performances assez extraordinaires avec la stabilisation aux résines mais il demeure un grand handicap de surcoût des procédés par rapport aux stabilisants usuels.

AVANTAGES

Action énergétique, prise rapide, facilité d'incorporation dans la terre du fait d'une viscosité comparable à celle de l'eau, possibilité de solidifier des sols très humides.

DESAVANTAGES

Coût élevé, technologie de production sophistiquée réservée aux pays industrialisés, dosages de traitement souvent aussi importants que pour les stabilisants conventionnels, toxicité des produits, manipulation délicate requérant l'emploi de catalyseurs, sensibilité à l'eau et durabilité non assurée, produits biodégradables.

MECANISMES ET PRINCIPES

Les résines sont constituées de molécules à longue chaîne résultant de la liaison (polymérisation) de certains agents chimiques (monomères et polymères). On peut les employer de 2 façons différentes :

- Les monomères sont ajoutés à la terre en même temps qu'un catalyseur : les réactions entre la terre et les monomères ainsi que la polymérisation sont immédiates; c'est le cas des résines abiétiques p.e.
- Le polymère est formé au préalable par voie synthétique ou naturelle puis ajouté à la terre à l'état solide, en solution ou en émulsion.

Les résines agissent différemment, soit comme floculant; comme dispersant ou comme acide. Néanmoins la plupart des produits jouent le rôle d'imperméabilisant et ceux plus sophistiqués peuvent améliorer la cohésion de la terre.

1 - PRODUITS NATURELS TRANSFORMES

- **GOMME ARABIQUE** : elle est extraite de l'acacia. Son pouvoir imperméabilisant est faible car elle reste soluble dans l'eau. Elle agit davantage comme un floculant et favorise une augmentation de la résistance en compression à sec, ralentit l'absorption d'eau par capillarité en agissant sur la cinétique du phénomène.

- **PALMO-COPAL** : le copal est une résine extraite de certains arbres tropicaux. Le palmo-copal est une solution de copal pyrogéné dans de l'huile de palme. Le dosage varie de 3 à 8 % pour les terres sableuses. Le copal de Manille, autre variété, est la seule résine de copal qui a un pouvoir imperméabilisant.

- **RESINE DE WALLABA** : hydrofuge.

- **COLOPHANE** : obtenue durant la distillation des essences térébenthines à partir des résines huileuses de sapin. Soluble dans des solvants organiques et dans des solutions aqueuses d'hydroxydes alcalins. La résine colophane forme un gel après réaction avec certains sels métalliques (fer et aluminium). Réduit l'absorption d'eau des terres.

- **VINSOL** : provient également du processus de fabrication de la térébenthine. S'emploie pour les terres acides à des taux contrôlés critiques (± 1 %). Hydrofuge; améliore la cohésion mais n'affecte pas la résistance en compression.

- **LIGNINE** : déchet résiduel de l'industrie papetière. Sorte de liqueur résineuse alcaline à pouvoir imperméabilisant. Produit soluble qui peut être insoluble par réaction avec le chrome : la chromo-lignine est malheureusement un produit cher.

- **MELASSES** : les aldéhydes du sucre de mélasses déshydratées peuvent être polymérisées à haute t° et à l'aide de catalyseurs phénoliques. Le matériau résineux obtenu présente des caractéristiques similaires à celles d'un asphalte naturel et d'une résine synthétique.

- **ETHYLCELLULOSE** : résine synthétique qui a été testée sans résultat satisfaisant.

- **CELLULOSE CARBOXYMETHYLIQUE** : stabilisant non ionique à action coagulante, soluble dans l'eau.

- **GOMME-LAQUE** : confère de bonnes résistances aux terres sableuses mais le matériau stabilisé ne résiste pas à l'eau.

2 - RESINES A BASE DE FURFUROL

Le furfurol (ou furfural) est un aldéhyde toxique que l'on trouve dans les alcools de grains ou dans les matériaux suivants : écorces de riz, de cacahuètes, de grains de coton, bagasse, trognon et tiges de maïs, noyau d'olive, à des pourcentages de 10 à 20 %.

- **ANILINE FURFURAL** : mélange de furfural et d'aniline qui est une amine cyclique dérivée du benzène aujourd'hui extraite de la houille. Mélanger dans les proportions de 70 % d'aniline et de 30 % de furfural. Produit très toxique dosé de 2 à 6 % pour la stabilisation des terres. Hydrofuge les particules par échange ionique et cimente par polymérisation.

- **ALCOOL FURFURYLIQUE** : composé organique dérivé de l'aldéhyde furfurylique qui polymérise en présence de certains catalyseurs donnant des polymères aux excellentes propriétés mécaniques. Amélioration des résistances mécaniques sèches et humides, ralentissement de l'absorption d'eau.

- **RESORCINOL-FURFUROL** : s'emploie en solution aqueuse catalysée en milieu basique par de la soude. Produit toxique et très souvent cher.

- **UREE-FURFUROL ET PHENOL-FURFUROL** : stabilisants testés seuls ou mélangés avec de l'aniline-furfurol : résultats décevants.

3 - RESINES A BASE DE FORMALDEHYDE

La formaldéhyde est un liquide volatil obtenu par oxydation de l'alcool méthylique.

- **RESORCINOL-FORMALDEHYDE** : mélange de résorcinol, phénol antiseptique dérivé du benzène et de formaldéhyde. Donne une résine qui agit par cimentation mais aussi comme hydrofuge. Réduit l'absorption d'eau.

- **PHENOL-FORMALDEHYDE** : résultats connus satisfaisants.

- **UREE-FORMALDEHYDE** : action similaire à celle de l'aniline-furfurol.

- **CALCIUM-SULFAMATE-FORMALDEHYDE** : résultats connus non satisfaisants.

- **MELAMINE-FORMALDEHYDE** : bons résultats de résistance à sec mais perte de 50 % de résistance à l'état humide.

4 - RESINES A BASE DE COMPOSES ACRYLIQUES

- **ACRYLATE DE CALCIUM** : résine soluble dans l'eau; forme un gel insoluble avec la terre qui prend une consistance de caoutchouc ou qui devient rigide suivant le pourcentage de teneur en eau.

- **NITRITE ACRYLIQUE** : résine employée en injection. Cimente et imperméabilise. La nitrite d'amine acrylique, autre composé dérivé agit de façon similaire.

- **POLYACRYLAMIDES** : polymère cationique.

5 - RESINES A BASE D'UREE

- **RESINE POLYURETHANE**

- **UREE-FORMOL**

- **METHYL-UREE**

- **DIMETHYLOL-UREE** : donne les meilleurs résultats connus sur ces résines à base d'urée mais les résistances humides sont faibles.

6 - RESINES A BASE DE POLYVINYL

- **ALCOOL POLYVINYLIQUE** : stabilisant non ionique qui forme des pellicules résistantes et flexibles par évaporation de solutions aqueuses mais solubles dans l'eau. Doit être combiné avec des huiles naturelles ou des hydrofuges pour être efficace.

- **ACETATE DE POLYVINYL** : produit indiqué pour les terres sableuses car il améliore leur cohésion. Destruction totale du produit par immersion dans l'eau.

7 - AUTRES PRODUITS

- **COMPOSES D'ALUMINIUM**

- **RESINE EPOXYDE**

- **PHENOL-FORMOL**

Les stabilisants classés sous l'appellation de produits naturels regroupent des produits d'origine géologique, animale ou végétale. Pour les produits d'origine végétale, on évoquera tout autant ceux qui sont directement extraits de la végétation et tributaires d'une préparation légère que ceux qui sont traités comme de véritables produits de synthèse : déchets agricoles p.e. Les données scientifiques exactes concernant ces stabilisants naturels, dont l'emploi est pour beaucoup lié aux savoir-faire traditionnels, sont rares et les recherches pratiquement inexistantes. Néanmoins, depuis ces dernières années, quelques laboratoires et autres de recherche commencent à s'intéresser de plus près à l'étude de ces produits.

L'intérêt que l'on accorde à ces produits réside dans leur disponibilité sur place. En fait, ces produits sont rarement disponibles en quantité suffisante pour qu'ils puissent être employés au-delà d'une utilisation individuelle. D'autre part, du fait de leur rareté et de leur préparation artisanale, beaucoup de ces produits ont une valeur marchande supérieure à celle des produits industriels : la gomme arabique p.e. Souvent, ces produits présentent une utilité sociale, pour être employés en agriculture ou même en alimentation, si bien que leur emploi en tant que stabilisant est peu acceptable.

L'action de ces stabilisants naturels n'est pas toujours efficace sauf pour des conditions de préparation et d'environnement très particulières. Mais ces produits ont l'avantage, pour le problème de la résistance à l'eau du matériau p.e., de ralentir la cinétique des dégradations. L'absorption d'eau par un mur traité sera plus lente que pour un mur non traité ce qui permet de prévenir les dégradations (entre deux saisons des pluies p.e.); alors qu'un mur non traité se dégrade très vite. On retiendra que ces produits naturels n'ont pas l'efficacité des produits de synthèse industriels tels que ciment, chaux, bitume, etc ...

1 - PRODUITS D'ORIGINE GEOLOGIQUE

Ce sont des produits employés pour corriger la texture des terres. P.e., on ajoute des sables pour stabiliser des argiles ou inversément. Parfois, pour obtenir des effets très particuliers, on sélectionne des terres très spécifiques : la bentonite p.e. que l'on ajoutera en faible quantité à la terre à traiter. Il s'agit d'une argile smectique à pouvoir dégraissant qui se dilate en présence d'eau, formant ainsi une barrière hydrofuge.

Certaines terres (surtout des sables d'origine volcanique) ont des propriétés pouzzolaniques naturelles. Elles peuvent être utilisées pour stabiliser des terres argileuses mais on doit souvent leur ajouter au moins 30 % de chaux ou de ciment, pour devenir un liant efficace qui à son tour stabilisera l'argile à des taux de 8 % p.e.

2 - PRODUITS D'ORIGINE ANIMALE

Ils sont très rarement employés pour stabiliser des murs ou des parties de bâtiment dans leur masse mais plutôt réservés à la stabilisation des enduits.

- EXCREMENTS : on connaît l'emploi d'excréments de toute sorte. La bouse de vache est sans doute la plus employée bien que davantage utilisée comme engrais ou comme combustible. Cet excrément n'a finalement que peu d'effet en ce qui concerne la résistance à l'eau et réduit la résistance à la compression. D'autres traditions emploient le crottin de cheval ou de dromadaire, la fiente de pigeon. L'action de ces excréments est plus probablement dûe à la présence de fibres (paille mêlée), d'acide phosphorique et de potasse. On connaît aussi l'emploi d'urines animales. P.e., l'urine de cheval qui lorsqu'elle remplace l'eau de gâchage (préparation d'un torchis p.e.) élimine efficacement la fissuration et augmente notoirement la résistance à l'érosion de la terre. En emploi combiné avec la chaux, les résultats sont surprenants.

- SANG D'ANIMAUX : on connaît surtout l'emploi du sang de boeuf déjà employé par les romains. En combinaison avec la chaux ou des polyphénols, la stabilisation au sang de boeuf est efficace. Le sang doit être frais et non sous forme de poudre.

- FIBRES OU POILS D'ANIMAUX : les poils ou crins d'animaux jouent le même rôle que certaines fibres végétales mais leur emploi est surtout réservé à la stabilisation des enduits.

- CASEINE : la caséine protéique (moyenne partie des protides du lait) est parfois employée dans la stabilisation sous forme de petit lait, en combinaison avec le sang de boeuf. Certaines poudres de lait auraient été employées et donneraient de bons résultats. On connaît aussi le savon de Poulh qui est de la caséine délayée et battue comme une pâte, préalablement mélangée à de la poussière de briqueterie avant d'être ajoutée à la terre.

- CHAUX : on peut préparer de la chaux à partir de coquillages ou de coraux. Cette fabrication est encore pratiquée dans certains pays : Somalie, Sénégal, p.e.

- COLLES ANIMALES : elles peuvent être utilisées en stabilisation (enduits). Ces colles animales sont fabriquées à partir de cornes, d'ossements, de sabots, de peaux.

- TERMITIERES : les termites secrètent une substance active, sorte de polymère non ionique du groupe des celluloses et de type polysaccharide. Les termitières résistent bien aux intempéries et leur terre peut être mélangée avec une autre pour fabriquer des blocs. La sécrétion des termites a été reproduite par synthèse par des chercheurs, en Afrique du Sud, mais le produit coûte trois fois plus cher qu'un ciment.

- HUILES, GRAISSES : les huiles de poisson et graisses animales peuvent jouer un rôle d'imperméabilisant. De même, les stéarates contenus dans les graisses animales jouent le même rôle.

3 - PRODUITS D'ORIGINE VEGETALE

- CENDRES : riches en carbonate de calcium, les cendres de bois dur ont un pouvoir stabilisant mais ne conviennent pas toujours pour les terres que l'on conseille de stabiliser à la chaux. Les taux classiques d'ajout de cendres sont de 5 à 10 %. Elles améliorent la résistance à la compression sèche mais ne réduisent pas la sensibilité à l'eau.

- HUILES ET GRAISSES VEGETALES : pour être efficace, les huiles végétales doivent être siccatives afin de durcir au contact de l'air et d'être insolubles à l'eau. On connaît l'emploi de l'huile de ricin, très efficace, mais très chère car utilisée en aéronautique. Egalement employées, les huiles de coco, de coton, de lin. L'huile de kapok préparée à partir d'une torréfaction des graines de kapok, donnant une farine que l'on transforme en bouillie (20 à 25 l. d'eau pour 10 kg de poudre) peut être efficace suivant l'état des graines et leur traitement par torréfaction qui augmente leur rendement, ainsi que suivant la durée de la préparation de la bouillie (6 h. d'ébullition). On connaît aussi l'acide palmitique, préparé à partir d'une saponification de l'huile de palme et une précipitation par HCl dilué à 25%. On récupère environ 1 kg d'acide palmitique par kg de savon de palme en solution.

L'acide palmitique mélangée à de la chaux donne le palmitate de calcium utilisé dans la stabilisation d'enduits.
Egalement employés, l'huile ou le beurre de karité pour la réfection d'enduits. Ce produit également utilisé pour la fabrication de savon est de moins en moins disponible pour la construction.

- TANNINS : ils agissent souvent comme des dispersants et améliorent l'enrobage des grains par les argiles. Ce sont également de bons acides de compactage (désagrégation des mottes)et ils réduisent la perméabilité. Les dosages en tannins varient de quelques % de l'eau de gâchage, pour les produits les plus actifs, jusqu'au remplacement total de l'eau de gâchage pour l'emploi de décoctions de tannins. Les tannins d'écorce de néré, de chêne, de châtaignier, d'acacia scorpioide (gonahier) sont les plus connus.

- ACIDES HUMIQUES OU POLYPHENOLS : dérivés de la lignine, ils forment des complexes durs et stables surtout avec les terres ferralitiques.

- SEVES ET LATEX : on connaît l'emploi du jus de feuilles de bananier, précipité avec de la chaux qui améliore la résistance à l'érosion et ralentit l'absorption d'eau. Les latex de certains arbres, p.e.l'euphorbe, sont légèrement imperméabilisants. Egalement le caoutchouc d'hévéa, le concentré de jus de sisal sous forme de colle organique. Les latex se mélangent aux terres acides(coagulation), mieux avec des terres basiques.

Ces stabilisants sont des produits industriels ou de synthèse, ou encore des déchets industriels. Ce sont aussi des produits naturels qui exigent une transformation sophistiquée. Ces produits font aujourd'hui l'objet de recherches en laboratoire. Leur économie n'est pas très satisfaisante et leur efficacité souvent douteuse. Certains des produits énumérés sont connus depuis quelques temps, d'autres abandonnés. Ils sont généralement peu utilisés.

1 - ACIDES

Leur emploi est toujours plus ou moins dangereux. Chaque variété d'acide entraîne une réaction particulière. Ils modifient le pH des terres auxquelles on les incorpore, entraînant une floculation dont les effets sont souvent réversibles. Certains acides réagissent comme des catalyseurs formant des phosphates insolubles. L'acide chlorhydrique (HCl) et l'acide nitrique (HNO_3) donnent une stabilisation modérée. L'acide fluorhydrique (HF) est très efficace pour toutes les terres (sauf si elles sont très riches en aluminium) : la réaction entraîne la formation de silicofluorides insolubles et résistants. L'acide sulfurique(H_2SO_4) est d'une efficacité douteuse. L'incorporation d'acide phosphorique ($P_2 O_5$) provoque une réaction d'hydratation avec formation d'anhydrite phosphorique (H_3PO_4) qui réagit avec les minéraux argileux : création d'un gel de phosphates d'aluminium et de fer qui cimente les grains entre eux et qui est insoluble.

2 - SOUDES

Les soudes provoquent une cimentation par une réaction avec les minéraux qui produit des silicates et aluminates insolubles.

La soude caustique agit comme un dispersant en dégradant les minéraux par une attaque alcaline. Le produit réagit fortement avec les terres latéritiques ainsi qu'avec des terres riches en aluminium. Les meilleures résistances sont obtenues après une cure suffisante des matériaux. La soude caustique n'est pas adaptée à une stabilisation des terres riches en montmorillonites. On connaît aussi l'emploi de :

. hydroxyde de barium : $Ba(OH)_2$, 8 H_2O;
. hydroxyde de calcium : $Ca(OH)_2$;
. hydroxyde de potassium : KOH, ½ H_2O;
. hydroxyde de lithium : LiOH, H_2O.

3 - SELS

L'action des sols sur les terres provoque des réactions colloïdales,modifie les caractéristiques de l'eau et entraîne une floculation. En augmentant l'attraction entre les particules fines de la terre les sels favorisent la création de particules plus grandes. Cette réaction de floculation provoque une réduction de la densité et une augmentation de la T.E.O., de la perméabilité et de la résistance mais une diminution de la plasticité. Les sels agissent sur l'eau interstitielle et réduisent la perte d'eau des terres, ralentissent l'évaporation, réduisent l'absorption d'eau. Mais, l'efficacité d'un traitement d'une terre au sel dépend de l'importance des mouvements d'eau dans le matériau stabilisé. Le traitement n'est pas toujours durable car les sels peuvent être lessivés et se dissoudre avec les réhumidifications du matériau. Les dosages en sel varient de 0,5 à 3 %. Il y a 4 sels principaux :

. Chlorure de sodium : floculant et aide de compactage; efficace pour les sols non salins.
. Chlorure de calcium : imperméabilisant.
. Chlorure ferrique : puissant coagulant et floculant.
. Chlorure d'aluminium : électrolyte coagulant, consolidation électrochimique des terres.

Les sels ne sont jamais à utiliser en combinaison avec le ciment.

4 - DERIVES D'AMINES QUATERNAIRES

Certains composés d'amines quaternaires de type cationique sont utilisés seuls ou parfois comme additifs secondaires avec le ciment ou les bitumes à une concentration correspondant à 5 à 10 % de la capacité d'échange cationique de la fraction argileuse. Ils agissent comme des liants et hydrophobants. Leur production est sophistiquée et le mélange à la terre pour de faibles concentrations est difficile. Ces produits restent chers et difficilement disponibles. Les dérivés d'amines quaternaires les plus efficaces sont les amines aromatiques ou oliphatiques, les sels d'amines. Ces produits sont souvent efficaces à des taux de 0,5 %. On observe une formation d'un film hydrophobant autour des particules qui, à cause de ses propriétés tensio-actives diminue l'absorption d'eau par capillarité. Ces traitements sont assez adoptés aux problèmes de remontées capillaires et peuvent convenir pour les soubassements sujets à une pathologie humide. Ces produits ne restent pas toujours efficaces en cas d'immersion du matériau ou après un assèchement complet de longue durée.

5 - SILICATES

Le silicate de sodium est assez bon marché et disponible en maintes régions du monde. On l'utilise généralement à raison de 5 % et il s'avère intéressant pour stabiliser les terres sableuses, les terres sableuses argileuses ou limoneuses, les sables riches en limonite (certaines latérites) des régions arides, les terres qui en général manquent de cohésion. Ce produit ne convient pas pour les terres argileuses. Le silicate de sodium agit aussi comme un imperméabilisant notamment pour un traitement de surface des matériaux. Une cure d'au moins sept jours est nécessaire pour garantir une efficacité du traitement. Le produit est très soluble mais peut être rendu insoluble par réaction avec la chaux hydratée. Le silicate de sodium peut être mis en solution dans l'eau, il est alors connu sous le nom de "verre liquide". D'autres silicates peuvent être employés, tels le silicate de potassium et le silicate de calcium.

6 - STEARATES

Ce sont des sels ou ester de l'acide stéarique contenus dans les graisses animales. Ils agissent comme des imperméabilisants. Les stéarates d'aluminium et de magnésium ainsi que le stéarate de zinc peuvent convenir.

7 - PARAFFINE

La paraffine est un mélange d'hydrocarbures saturés solides caractérisés par leur indifférence aux agents chimiques. Elle peut être employée comme aide de compactage mais doit être préalablement dissoute dans un corps gras.

8 - CIRES

Les cires industrielles peuvent être utilisées comme aide de compactage. Elles sont souvent ajoutées à un autre stabilisant.

9 - LATEX

Les latex industriels ou synthétiques, dissous dans l'eau et ajoutés en proportion de 3 à 15 % peuvent donner de bons résultats. Ces produits sont des liants et des imperméabilisants.

10 - COLLES SYNTHETIQUES

Les colles synthétiques à 1 ou 2 composantes.

11 - SAVONS

L'emploi de détergents ioniques à un taux de 0,1 à 0,2 % n'a pas d'effet sur la résistance mais diminue la sensibilité à l'eau jusqu'à 25 %.

12 - DECHETS INDUSTRIELS

Certains déchets industriels peuvent être employés pour stabiliser la terre.

- HUILE DE VIDANGE : action peu durable du fait d'un délavage à la pluie; imperméabilisant.
- LAITIERS DE HAUTS-FOURNEAUX : ce sont des scories composées de silicates qui peuvent être proches des ciments portland selon leur composition. Certaines qualités de cendres volantes sont totalement inopérantes.
- LIGNINE ET LIGNOSULFATES : sous-produit de l'industrie du bois soluble dans l'eau que l'on peut rendre insoluble en les mélangeant avec des sels de chrome (bicromate de potassium ou de sodium) et qui donnent un gel épais, la chromolignine. Produit imperméabilisant mais cher.
- MELASSES : produit de l'industrie sucrière; amélioration de la résistance à la compression et réduction de la capillarité. Ajoutées à des taux de 5 %, couvrement pour les terres sableuses et limoneuses. Ajouter de la chaux pour les terres argileuses.
- POUZZOLANES : doivent être utilisées avec de la chaux pour être efficaces.
- AUTRES PRODUITS DIVERS : soufre plastifié, sulfonates et versenates (dispersants), siliconates (hydrophobants).

13 - PLATRE

Le plâtre ou sulfate de calcium est un stabilisant intéressant pour des terres sableuses manquant de cohésion. Peu recommandé pour les terres argileuses. Le plâtre seul donne de bons résultats pour des taux pas supérieurs à 15 % : risques de prise trop rapide qui ne doit pas avoir lieu avant le moulage d'où des problèmes de préparation en petites quantités. Le plâtre peut être combiné à la chaux (1-1) mais non avec le ciment : résultats catastrophiques. Le mélange plâtre-chaux peut convenir pour les terres argileuses qui ne résistent pas à l'eau si elles sont stabilisées au plâtre seul. Pour des terres sableuses moulées sous forme d'adobe, au moins 5 à 10 % de plâtre sont nécessaires, parfois jusqu'à 20 %. La résistance humide des matériaux stabilisés au plâtre demeure faible ou égale aux matériaux non stabilisés. Des tentatives infructueuses de stabilisation ont été faites avec l'anhydrite de calcium (plus pur que le gypse).

Les produits présentés par la suite sont disponibles sur le marché. Beaucoup de ces produits sont proposés par les producteurs ou leurs agents commerciaux comme étant des produits "miracle". On n'insistera donc jamais assez sur la nécessité de vérifier systématiquement leur efficacité réelle et de peser le bien-fondé des argumentations commerciales présentées sur les documentations publicitaires ou même oralement, ou encore sur des rapports techniques de laboratoire.

La majorité de ces produits commercialisés sont à base de produits industriels connus et agissent selon les mécanismes de ces produits. Pourtant, les fabricants ne décrivent pas toujours leur produit avec précision, tenant parfois leur formule secrète. On remarquera que la plupart de ces produits ne sont pas brevetés car étant pour majorité déjà tombés dans le domaine public. P.e., un produit à base de 90 % d'acide sulfurique sera décrit comme "un liquide catalyseur, soluble dans l'eau et provoquant un échange d'ions". Il paraît donc indispensable d'exiger des agents commerciaux une identification précise de leur produit et éventuellement de s'informer auprès de spécialistes (ingénieurs-chimistes p.e.). Cette méfiance ne doit pas pour autant conduire à un rejet systématique de ces produits car certains d'entre eux sont efficaces mais pour des applications précises.

Beaucoup des produits commercialisés ont été élaborés pour une utilisation dans la stabilisation des routes. Un grand nombre d'entre eux ont été développés dans le cadre d'applications militaires durant de récents conflits, afin de stabiliser dans les plus brefs délais des routes impraticables ou pour aménager des aires d'atterissage, des héliports, sur des terrains marécageux, en quelques heures. La durabilité de ces applications n'a pas été le plus souvent garantie au-delà de quelques mois. Il ne faut donc pas oublier cette destination d'emploi de ces produits car les exigences posées pour la stabilisation des routes temporaires et les conditions d'exploitation sont très différentes de celles exigées par la construction de bâtiments permanents. Certains de ces produits, très efficaces pour les routes, perdent rapidement leur pouvoir lorsqu'ils sont utilisés pour la stabilisation des murs. Les procès-verbaux de laboratoire doivent donc être interprétés en fonction de ces applications dans le domaine routier. Par ailleurs, bon nombre de tests et d'essais sont pratiqués sur des échantillons préparés par les fabricants des produits, ce qui ne permet pas aux laboratoires de se porter garant du produit même s'ils se portent garants des résultats obtenus sur le matériau.

Les dosages de ces produits, employés en stabilisation, sont extrêmement bas, souvent de l'ordre de 1 % ou même 0,1 % voire 0,01 %. On perçoit donc la difficulté d'un malaxage uniforme, lorsque l'on travaille p.e. une masse de terre de 1 tonne. Dans ce cas, l'emploi de 1 kg de produit exige un malaxage extrêmement bien soigné et une conscience professionnelle assurée.

Les études de prix de revient présentées par les fabricants démontrent le plus souvent un coût nettement inférieur à une stabilisation au ciment qui est d'habitude prise comme référence. Mais lorsque le dosage proposé ne s'avère pas efficace et qu'il est nécessaire de l'augmenter, le budget risque d'être largement dépassé. D'autre part, le prix de vente réel de ces produits intègre souvent une marge bénéficiaire excessive si l'on retient que la plupart de ces produits sont d'une efficacité moyenne et que ce sont des produits chimiques industriels des plus courants. Les prix sont souvent établis d'après un seuil-limite d'acceptabilité par rapport aux stabilisants conventionnels. Il n'est pas inhabituel de constater que des produits aux formules identiques peuvent être achetés chez d'autres fabricants de produits chimiques industriels à 20 ou 50 % moins cher.

L'emploi de ces produits peut s'avérer satisfaisant mais il importe avant tout de procéder à des enquêtes et des études préalables sérieuses.

PRODUITS COMMERCIALISES

PRODUITS	DOSAGE	BASE	OBSERVATIONS
ADOGEN 442	0,15 à 2 %	Amine quaternaire	
ALIQUAD H 226	0,15 à 2 %	Amine quaternaire	
AM 8 (9)		Polyacrylamide	Certaine toxicité
ARMEEN		Détergent polymère	
ARQUAD 2 TH		Détergent polymère dérivé d'amine quaternaire. Chlorure dialkyldiméthylamonium	
BLOC SOL	Très faible	Amine polymoléculaire + solvant + résines naturelles et synthétiques	Commercialisé par Prodo - Suisse
CONSERVEX SCX 444	0,5 à 1 %	Cutback et amine quaternaire	Imperméabilisant à employer avec Consolid SC 444
CONSOLID SC 444	0,05 %	Cire et détergent polymère	Aide de compactage à employer avec Consolid SCX 444
CRETASOL		Amine quaternaire sur charge calcaire	Identique au Stabiram - Ceca - France
DYNASOLO DS 328	0,02 à 0,1 %	Sel organique formant avec un sel métallique neutralisant un gel métallo-organique insoluble	Senda - Brésil
EARTH-PAK			Aide de compactage
FIXA-T	0,1 %		
GEOPOLYMER		Catalyseur à base d'un précurseur géopolymérique, l'oligosialate	Cordi s.a. - France
LANDSCAPE			Autre appellation pour RRP
LYTRON		Résine phénolique	Montsanto
MITSUI STOPPER		Polyuréthane	
NSP 121 ET 252		Résine hydrofuge naturelle	
NUX		Résine hydrofuge naturelle	
PACZYME			Aide de compactage
PLASMOFALT		Mélasse polymère + cutback	Identique à Plastic B
PLASTIC B		Lignosulfate et cutback (mélasse polymérisée)	Imperméabilisant + amélioration de la cohésion
RESINE 321		Dérivé de colophane	
RESORSABOND		Résorcinol + aldéhyde	
RRP		Acide sulfurique et hydrocarbones sulfonatés	Aide de compactage et éventuellement catalyseur ionique
STABILONIA	0,2 %	Acétate d'amine grasse	Similaire au Stabiram 677 N
STABINOL		8 % de ciment + 20 % de résine	Cohésif et hydrofuge
STABIRAM 677 N	0,2 à 1 %	Acétate d'amine grasse	Ceca - France
STASOL		Concentré acide et électrolyte	S'applique en 2 fois après 6 h de réaction de l'acide
S.I.S.	Très faible	Catalyseur ionique	Cerata - France
TACSS		Polyuréthane	
TERBEC		4-Tert-butylpyrocatechol	Imperméabilisant
TERRABIND A ET B		Résine abiétique lignosulfate	Identique à Résine 321, il faut ajouter du sulfate d'alumine
TERRABIND C			Liant
TERRABIND D		Amine quaternaire	

- AGRA. Recherche terre. Grenoble, AGRA, 1983.
- Alexander, M.L. et al. Relative stabilizing effects of various limes on clayey soils. In HRR, 1972.
- Coad, J.R. Parpaings de terre stabilisée à la chaux. In Bâtiment International, Paris, CIB, 1979.
- Cytryn, S. Soil construction. Jerusalem, the Weizman science press of Israël, 1957.
- Doat, P. et al. Construire en terre. Paris, éditions Alternatives et Parallèles, 1979.
- Doyen, A. Objectifs et mécanismes de la stabilisation des limons à la chaux vive. In La technique routière, Brussels, CRR, 1969.
- Dunlap, W.A. Soil analysis for earthen buildings. 2nd regional conference on earthen building materials, Tucson, University of Arizona, 1982.
- El Fadil, A.A. Stabilised soil blocks for low-cost housing in Sudan. Hatfield polytechnic, 1982.
- Ephoevi-Ga, F. La protection des murs en banco. in bulletin d'information, Cacavelli, CCL, 1978.
- Eurin, P.; Rubaud, M. Etude exploratoire de quelques techniques de stabilisation chimique de la terre. Grenoble, CSTB, 1983.
- France, S. et al. Traitement des sols a l'anhydrite en vue de la construction de parpaings de terre stabilisée. Douai, Ecole des ingénieurs des Mines, 1978.
- Gallaway, B.M.; Buchanan, S.J. Lime stabilization of clay soil. Agricultural and mechanical college of Texas, 1951.
- Geatec. Etude d'une terre crue renforcée à la résine furanique. Venelles, Geatec, 1982.
- Grésillon, J.M. Etude de l'aptitude des sols à la stabilisation au ciment. Application à la construction. In annales de l'ITBTP, Paris, ITBTP, 1978.
- Habibaghi, K.; Nostaghel, N. Methods of improving low-cost construction materials against earthquake. In New horizons in construction conference, Envo publishing company.
- Hammond, A.A. Prolongation de la durée de vie des constructions en terre sous les tropiques. In Bâtiment Build International, Paris, CSTB, 1973.
- Herzog, A.; Mitchell, J.K. Reactions accompanying the stabilization of clay with cement. 42nd annual meeting of the HRB, Washington, HRB, 1963.
- Houben, H. Technologie du béton de terre stabilisé pour l'habitat. Sidi Bel Abbes, CPR, 1974.
- Ingles, O.G. Advances in soil stabilization, In Pure and applied chemistry revue, 1968.
- Ingles, O.G.; Lee, I.K. Compaction of coarse grained sediments. Amsterdam, G.V. Chilingarian and K.H. Wolf, 1975.
- Ingles, O.G.; Metcalf, J.B. Soil stabilization. Sydney, Butterworths, 1972.
- Lilley, A.A.; Williams, R.I.T. Cement-stabilized materials in Great Britain. In Highway Reseach Record, Washington, HRB, 1973.
- Markus, T.A. et al. Stabilised soil. Glasgow, University of Strathclyde, 1979.
- Markus, T.A. Soil stabilization by synthetic resins. In Modern Plastics, New York, 1955.
- Martin, R. Etude du renforcement de la terre à l'aide de fibres végétales. In Colloque Construction en terre 1984, Vaulx-en-Velin, ENTPE, 1984.
- Mitchell, J.K.; El Jack, S.A. The fabric of soil cement and its formation. In Fourteen national conference on clays and clay minerals.
- Patty, R.L. Soil ad mixtures for earth walls. In Agricultural Engineering, Saint Joseph, ASAE, 1942.
- Ringsholt, T.; Hansen, T.C. Lateritic soil as a raw material for building blocks. In American Ceramic Society bulletin, 1978.
- Rocha Pitta M. Uma proposta para o estabelecimento de um método de dosagem de solo-cimento para uso na contrução de moradias. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1979.
- Seed, H.B. et al. The strength of compacted cohesive soils. ASCE research conference on the shear strength of cohesive soils, Denver, University of Colorado, 1960.
- Stulz, R. Appropriate building materials. St. Gallen, SKAT, 1981.

- The asphalt institute. The asphalt handbook. Maryland, The asphalt institute, 1975.
- Uzomaka, O.J. Performance characteristics of plain and reinforced soil blocks. In The international conference on materials of construction for developing countries, Bangcok, AIT, 1978.
- Williams, W. Construction of homes using on-site materials. In international journal IAHS, New York, Pergamon press, 1980.

500 CONVENANCE DES TERRES

L'expérience acquise à ce jour dans le domaine de la construction en terre est immense mais loin d'être complète ou définitive. Les critères de convenance actuels ne sont donc pas définitivement établis et ne sauraient être interprétés à la lettre.

La plupart des abaques de référence sont empruntées au domaine des travaux routiers et s'adaptent assez bien à la construction en terre. On retiendra toutefois que beaucoup de ces critères, élaborés à un niveau régional, n'ont pas une valeur universelle. On pourra s'en inspirer par une nouvelle adaptation localisée. Ces critères de convenance ne fournissent pas des quantités précises et doivent être utilisés pour leur information qualitative.

Leur interprétation sera donc très souple, ainsi que leur adaptation selon des plages de valeurs qui peuvent être plus ou moins élargies, tout en donnant de bons résultats. Néanmoins, ces critères devront être interprétés par des personnes expérimentées qui sont à même d'évaluer les conséquences de leur application.

En stabilisation, par exemple, il est donc possible de s'écarter quelque peu des meilleures conditions décrites pour les critères de convenance, mais il conviendra d'en mesurer le risque. Pour un emploi régulier d'une terre bien caractérisée, l'expérience confirmera la justesse des valeurs prises en compte. Le choix d'une bonne terre demeure le gage d'une économie du produit. Pour les travaux de grande taille, on préfèrera effectuer des essais comparatifs préalables sur des murs-tests construits selon différentes méthodes jusqu'à trouver la solution la plus convenable. Les tests et essais de terrain et de laboratoire demeurent essentiels pour assurer la meilleure efficacité. Ces critères de convenance sont donc des bases d'orientation générale qui ne sauraient être considérées comme des normes ou même des recommandations définitives.

PEUT-ON CONSTRUIRE AVEC CETTE TERRE ?

On ne peut raisonnablement répondre aussitôt à cette question. Il est préférable d'adopter une approche jalonnée par des questions successives :
- Que va-t-on construire? Un mur de clôture? Une maison de plain-pied? Un bâtiment à étage? etc...
- Où va-t-on construire? En région sismique? En région sèche ou pluvieuse? etc...
- Comment va-t-on construire? Quelle technique? Quel savoir-faire disponible? etc...
- Quelle destination d'emploi? En mur porteur ou non porteur? En mur intérieur ou extérieur? En arc, en voûte ou en dôme? En terrasse? Avec ou sans enduit? Avec ou sans protection? etc...
- Quels moyens disponibles? Peut-on stabiliser ou non? Peut-on amender la terre ou non? etc...

Répondre à la question "Peut-on construire avec cette terre" est tout à la fois impossible - si l'on y répond trop directement - et d'une facilité déconcertante - si l'on procède prudemment. En général, toute terre qui offre une bonne cohésion peut être employée en construction, mais il convient de bien s'assurer que l'on dispose de tous les moyens pour l'utiliser. Il faut aussi introduire une autre réflexion où la convenance de la terre est confrontée à la technique de construction, ou inversément, si le choix de la technique est posé par avance. Faut-il alors changer de terre si elle ne convient pas à la technique ou l'améliorer pour qu'elle convienne? Faut-il changer de technique si elle ne convient pas à la terre disponible ou améliorer cette technique pour qu'elle convienne? Les critères de convenance et les abaques de références orienteront les choix mais leur emploi demeure souvent problématique. Leur interprétation doit être souple et faite par des personnes compétentes. Ainsi, lorsque les décisions théoriques sont prises, on confirmera les performances pratiques de la terre par des essais.

PROPRIETES MECANIQUES DE PLUSIEURS COMPOSANTS DE LA TERRE

GROUPE	TAILLE	PERMEABILITE A L'ETAT SEC	PERMEABILITE A L'ETAT HUMIDE	STABILITE DE VOLUME	PLASTICITE ET COHESION	COMPRESSIBILITE A LA T.E.O.	DURABILITE (AROSAGE)	ABRASIVITE
SILTS		-	+	++	--	M	+	M
SABLES TRES FINS	〉1 μ	--	++	++	--	+	++	++
MICA	〉1 μ	M	+	++	-	--	--	-
CARBONATE	TOUT	M	M	++	-	++	++	-
SULPHATE	〉1 μ	M	M	++	-	+	-	M
ALLOPHANE	TOUT	M	++	M	++	++	-	-
KAOLIN	≃ 1 μ	-	-	+	M	-	+	-
ILLITE	≃ 0.1 μ	--	--	-	+	M	M	--
MONTMORILLONITE	〈0.01 μ	--	--	--	++	--	+	--
CHLORITE	≃ 0.1 μ	-	-	-	M	M	M	-
MATIERE ORGANIQUE	TOUT	++	++	+	M	--	--	-

++ TRES ELEVE
\+ ELEVE
M MOYEN
-- TRES FAIBLE
\- FAIBLE

TERRE		GONFLEMENT ET RETRAIT	SENSIBILITE AU SEL	DENSITE SECHE (T.E.O.) (kg/m³)	INDICE DE VIDES (vS = 2700 kg/cm³)	RESISTANCE A LA COMPRESSION (SEC)	CONVENANCE POUR LA CONSTRUCTION EN TERRE (SANS STABILISATION)
Gb	Grave propre bien graduée	TRES FAIBLE	TRES FAIBLE	› 2000	‹ 0.35		NE CONVIENT PAS AJOUTER FINES
Gm	Grave propre mal graduée	TRES FAIBLE	TRES FAIBLE	› 1840	‹ 0.45		NE CONVIENT PAS AJOUTER FINES
GL	Grave limoneuse	TRES FAIBLE	FAIBLE A MOYEN	› 1760	‹ 0.50		CONVIENT. MANQUE DE COHESION EROSION FORTE. AJOUTER FINES
GA	Grave argileuse	TRES FAIBLE	FAIBLE A MOYEN	› 1920	‹ 0.40		CONVIENT PARFOIS AJOUTER FINES
Sb	Sable propre bien gradué	TRES FAIBLE	TRES FAIBLE	› 1920	‹ 0.40		NE CONVIENT PAS AJOUTER FINES
Sm	Sable propre mal gradué	TRES FAIBLE	TRES FAIBLE	› 1600	‹ 0.70		NE CONVIENT PAS AJOUTER FINES
SL	Sable limoneux	TRES FAIBLE	FAIBLE A FORT	› 1600	‹ 0.70		CONVIENT. MANQUE DE COHESION EROSION FORTE. AJOUTER FINES
SA	Sable argileux	FAIBLE A MOYEN	FAIBLE A FORT	› 1700	‹ 0.60		CONVIENT PARFOIS AJOUTER FINES
Ap	Argiles peu plastiques	MOYEN A ELEVE	FAIBLE A FORT	› 1520	‹ 0.80	FAIBLE A FORT	CONVIENT PARFOIS AJOUTER TERRE SABLEUSE
Lp	Limons peu plastiques	FAIBLE A ELEVE	MOYEN A TRES FORT	› 1600	‹ 0.70	TRES FAIBLE	CONVIENT PARFOIS MANQUE DE COHESION
Op	Limons et Argiles organiques peu plastiques	MOYEN A ELEVE	MOYEN A FORT	› 1440	‹ 0.90		NE CONVIENT PAS PARFOIS CONVIENT
At	Argiles très plastiques	ELEVE	TRES FAIBLE	› 1440	‹ 0.90	MOYEN A TRES FORT	CONVIENT RAREMENT AJOUTER TERRE SABLEUSE
Lt	Limons très plastiques	ELEVE	MOYEN A FORT	› 1600	‹ 0.70	TRES FAIBLE A MOYEN	CONVIENT TRES RAREMENT
Ot	Limons et Argiles organiques très plastiques	ELEVE	TRES FORT	› 1600	‹ 0.70	MOYEN A FORT	NE CONVIENT PAS
T	Tourbes et autres sols très organiques	TRES ELEVE	FAIBLE				CONVIENT PARFOIS (COMME MOTTES DE TERRE)

TEXTURE	ETAT HYDRIQUE DE LA TERRE					
	PLASTIQUE		MOU		LIQUIDE	
	PATE FERME	PATE MI-FERME	PATE MI-MOLLE	PATE MOLLE	BOUE	BARBOTINE
ORGANIQUE						
GRAVELEUX			7		10	
SABLEUX		9	8			
LIMONEUX	6			12		11
ARGILEUX						

CONGLOMERAT COMPACT :
agglomération monolithique de matériaux grossiers; terre compacte et lourde que l'on découpe difficilement.

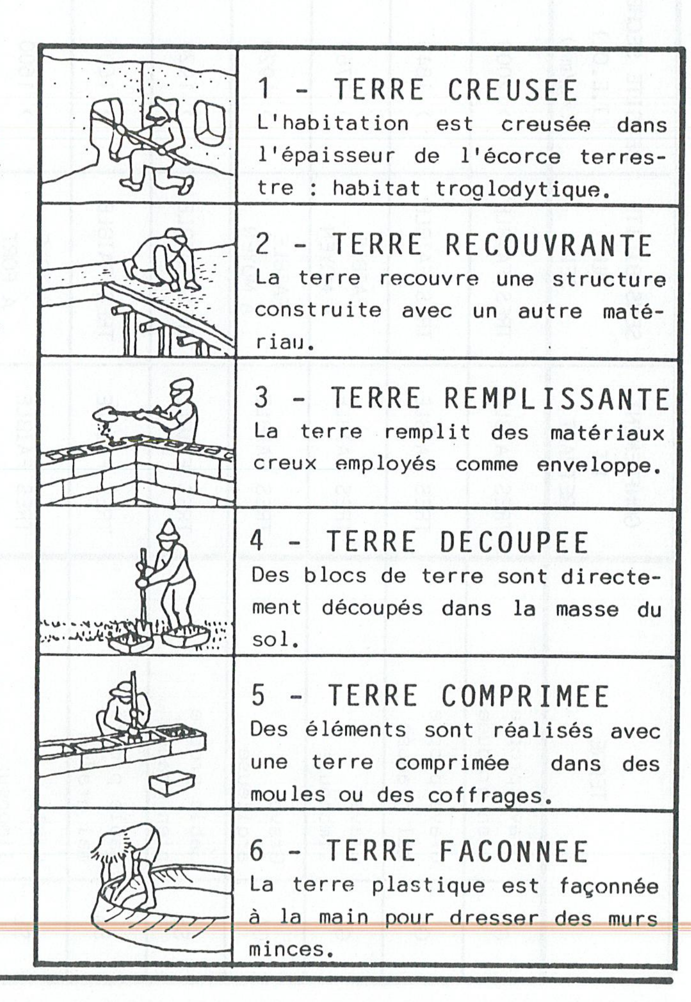
CONGLOMERAT FRIABLE :
agglomération de matériaux friables ou décomposés que l'on découpe facilement, incluant la tourbe ou les mottes de gazon.

CONCRETION SOLIDE :
terre complètement sèche, en gros morceaux ou en mottes solides.

CONCRETION FRIABLE :
terre complètement sèche sous forme pulvérisée.

TERRE PEU HUMIDE :
terre dont l'humidité naturelle est peu élevée (4-10 %)*; sensation tactile sèche plutôt qu'humide.

TERRE HUMIDE :
terre dont le toucher donne une sensation d'humidité réelle (8-18 %)*; ne peut être façonnée par manque de plasticité.



1 - TERRE CREUSEE
L'habitation est creusée dans l'épaisseur de l'écorce terrestre : habitat troglodytique.

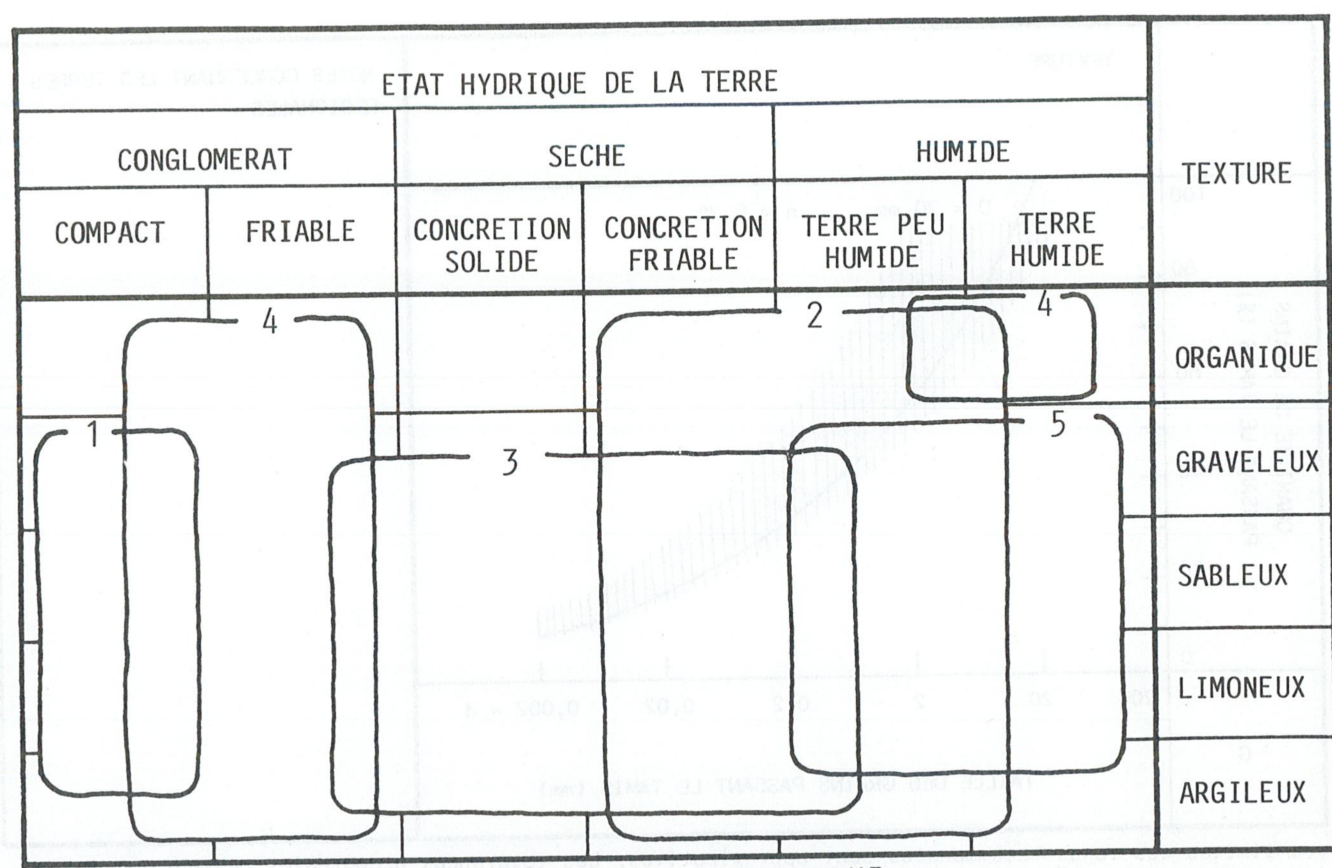
2 - TERRE RECOUVRANTE
La terre recouvre une structure construite avec un autre matériau.

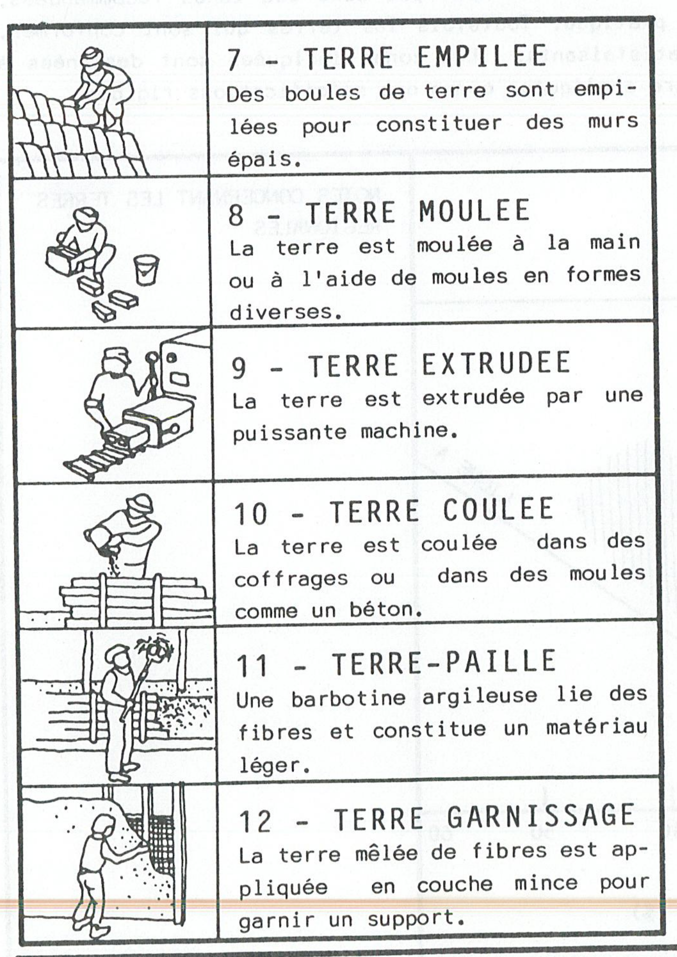
3 - TERRE REMPLISSANTE
La terre remplit des matériaux creux employés comme enveloppe.

4 - TERRE DECOUPEE
Des blocs de terre sont directement découpés dans la masse du sol.

5 - TERRE COMPRIMEE
Des éléments sont réalisés avec une terre comprimée dans des moules ou des coffrages.

6 - TERRE FACONNEE
La terre plastique est façonnée à la main pour dresser des murs minces.





7 - TERRE EMPILEE
Des boules de terre sont empilées pour constituer des murs épais.

8 - TERRE MOULEE
La terre est moulée à la main ou à l'aide de moules en formes diverses.

9 - TERRE EXTRUDEE
La terre est extrudée par une puissante machine.

10 - TERRE COULEE
La terre est coulée dans des coffrages ou dans des moules comme un béton.

11 - TERRE-PAILLE
Une barbotine argileuse lie des fibres et constitue un matériau léger.

12 - TERRE GARNISSAGE
La terre mêlée de fibres est appliquée en couche mince pour garnir un support.

PATE FERME :
une forte pression des doigts est nécessaire pour former une boule de terre (15-25 % de teneur en eau*) qui ne se déforme presque pas quand on la laisse tomber d'une hauteur de 1 mètre.

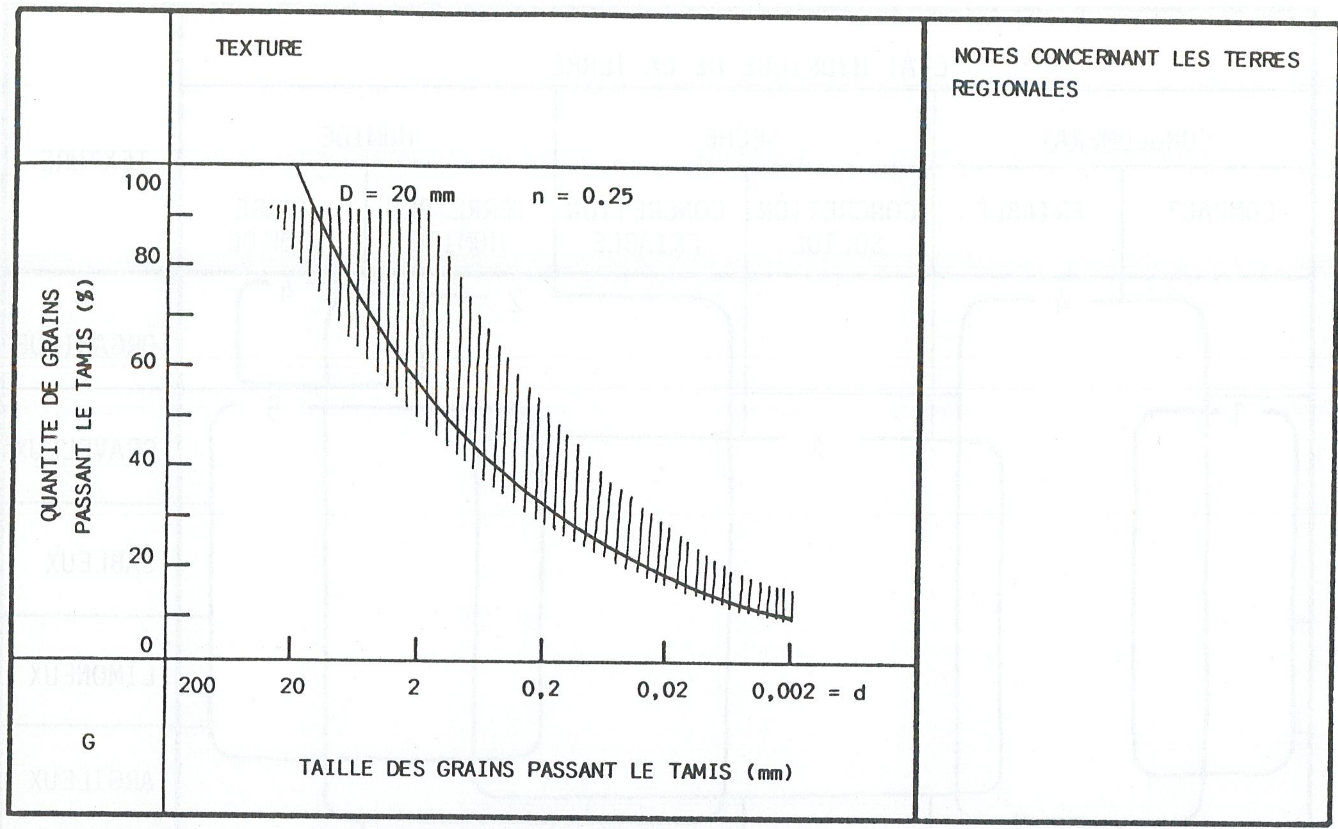
PATE MI-FERME :
une légère pression des doigts suffit pour former une boule de terre (15-30 % de teneur en eau *); en tombant d'une hauteur de 1 mètre, la boule s'affaisse légèrement sans se désagréger.

PATE MI-MOLLE :
on peut façonner très facilement une boule de terre homogène, non collante ni salissante (15-30 % de teneur en eau *); lâchée d'une hauteur de 1 mètre, cette boule s'affaisse notoirement sans se désagréger.

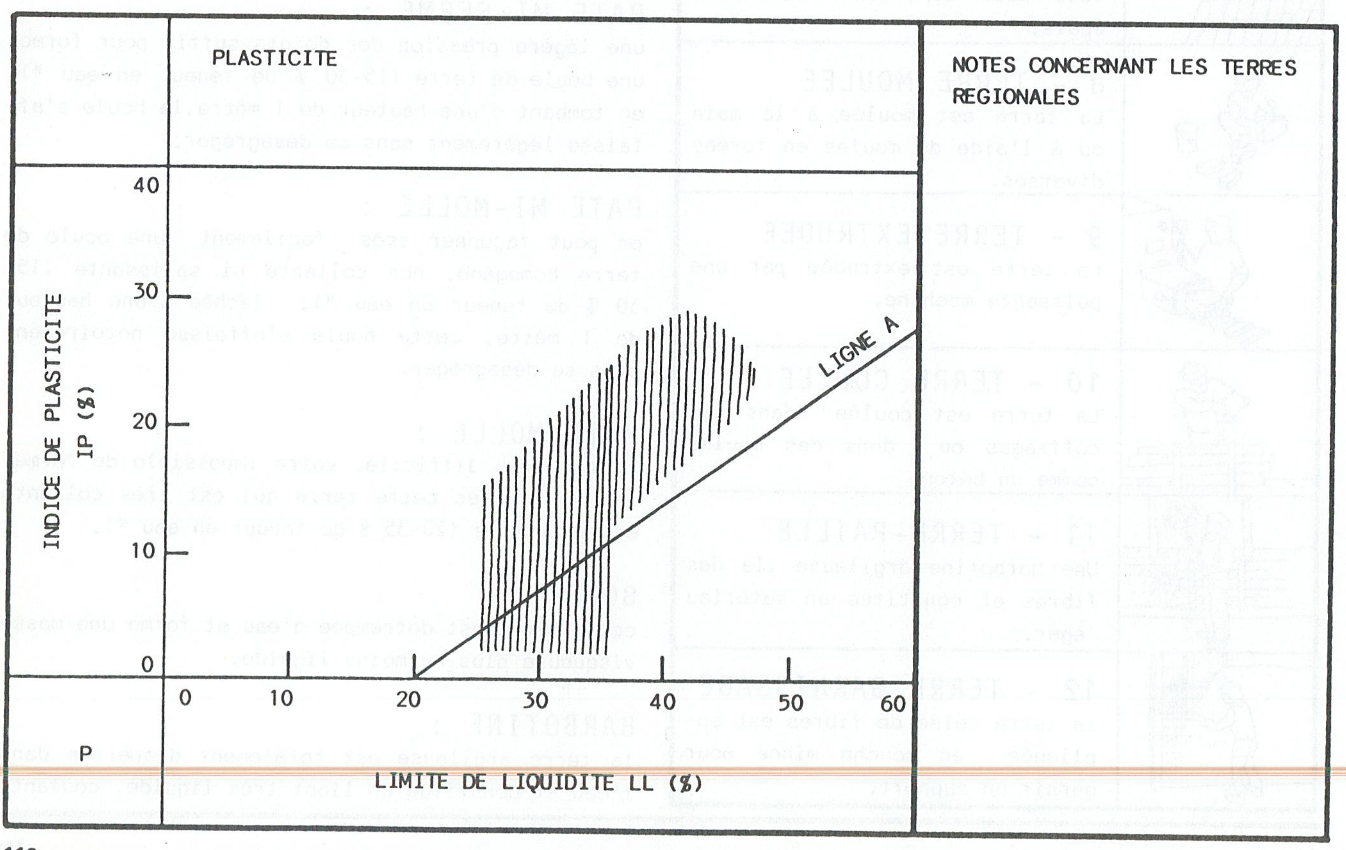
PATE MOLLE :
il est très difficile, voire impossible de former une boule avec cette terre qui est très collante et salissante (20-35 % de teneur en eau *).

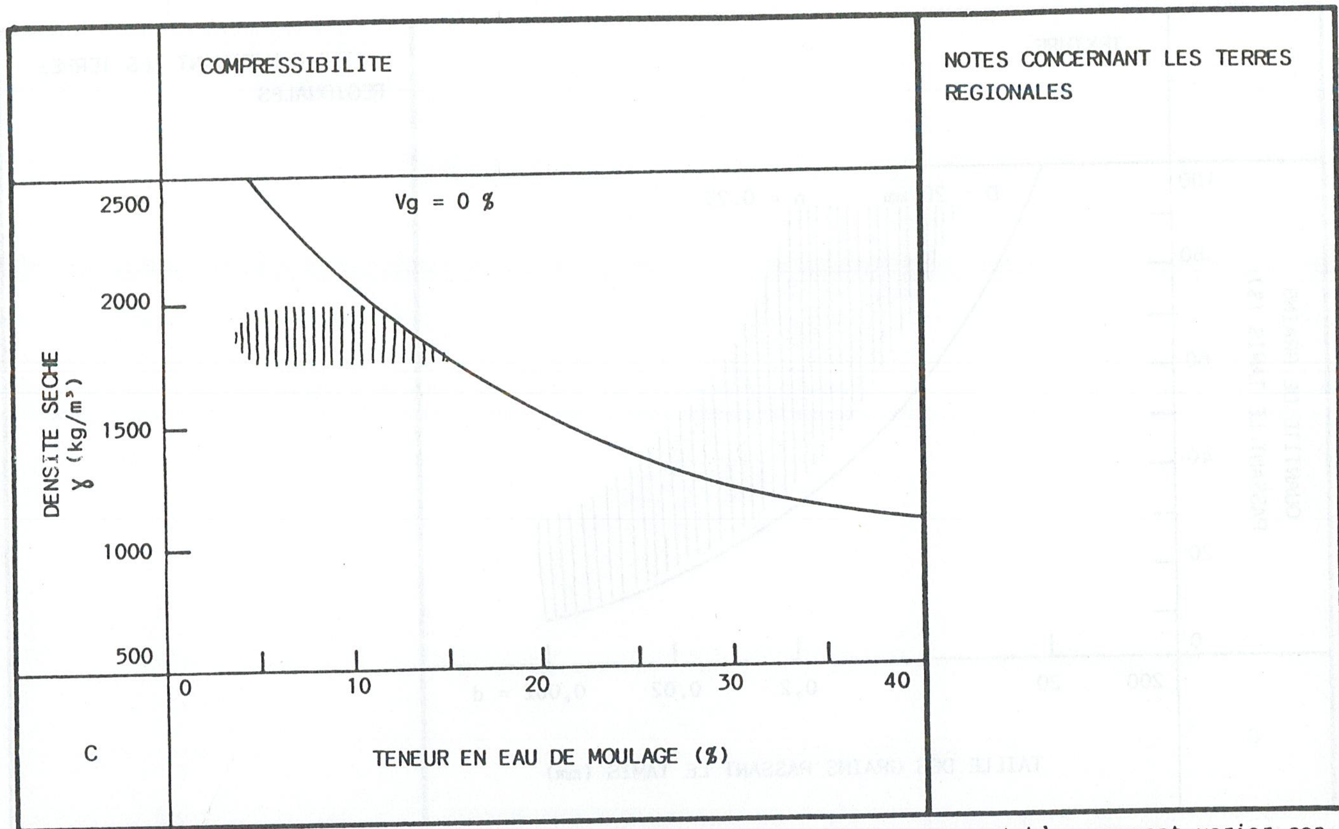
BOUE :
cette terre est détrempée d'eau et forme une masse visqueuse plus ou moins liquide.

BARBOTINE :
la terre argileuse est totalement dispersée dans l'eau et constitue un liant très liquide, coulant.

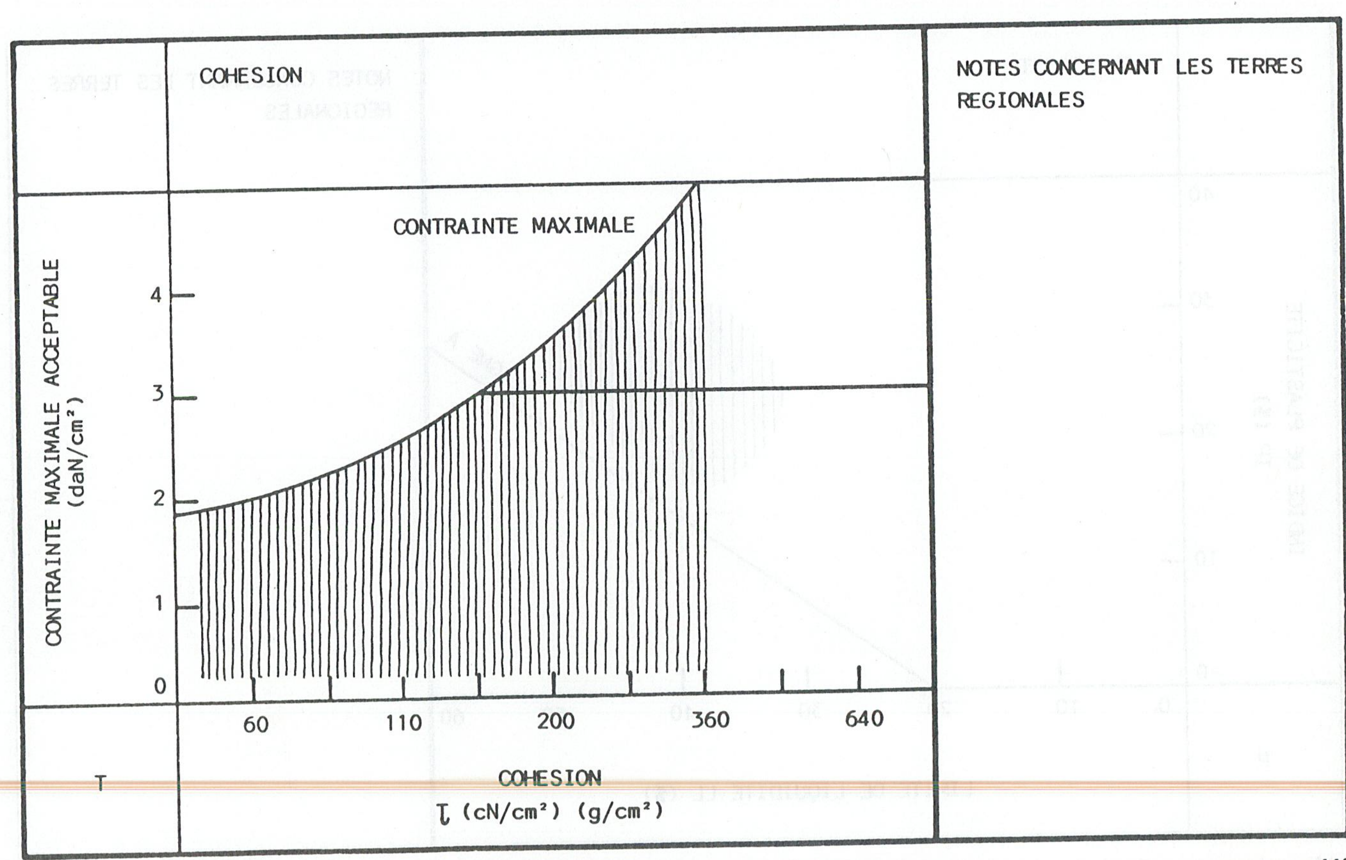


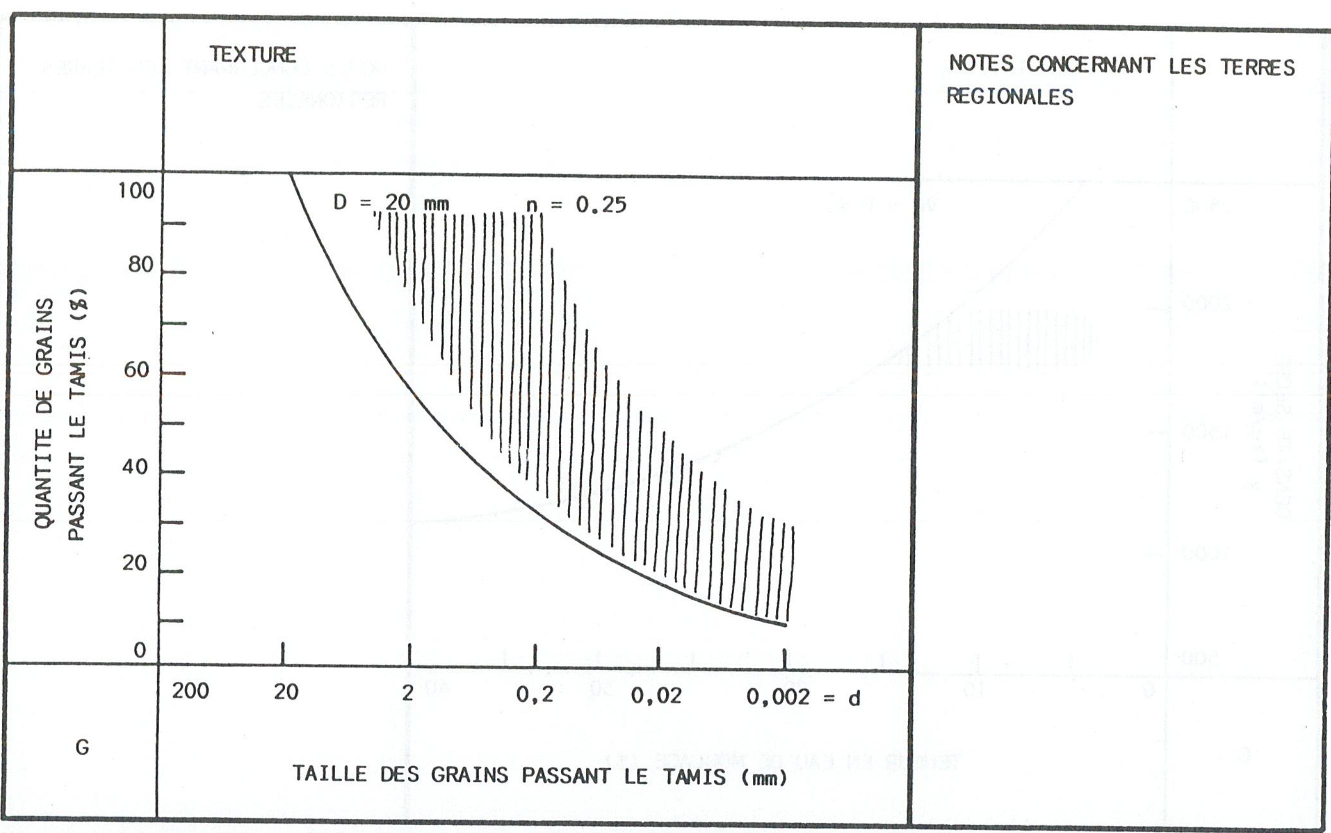
Les limites des zones recommandées sont approximatives. Les tolérances acceptables peuvent varier considérablement. L'état des connaissances actuelles ne permet pas d'appliquer des limites précises. Il est généralement admis que beaucoup de terres qui ne s'inscrivent pas dans les zones recommandées, donnent quand même des résultats acceptables en pratique. Toutefois les terres qui sont conformes, donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Les zones indiquées sont destinées à guider l'utilisateur et ne sont pas destinées à être appliquées comme des spécifications rigides.



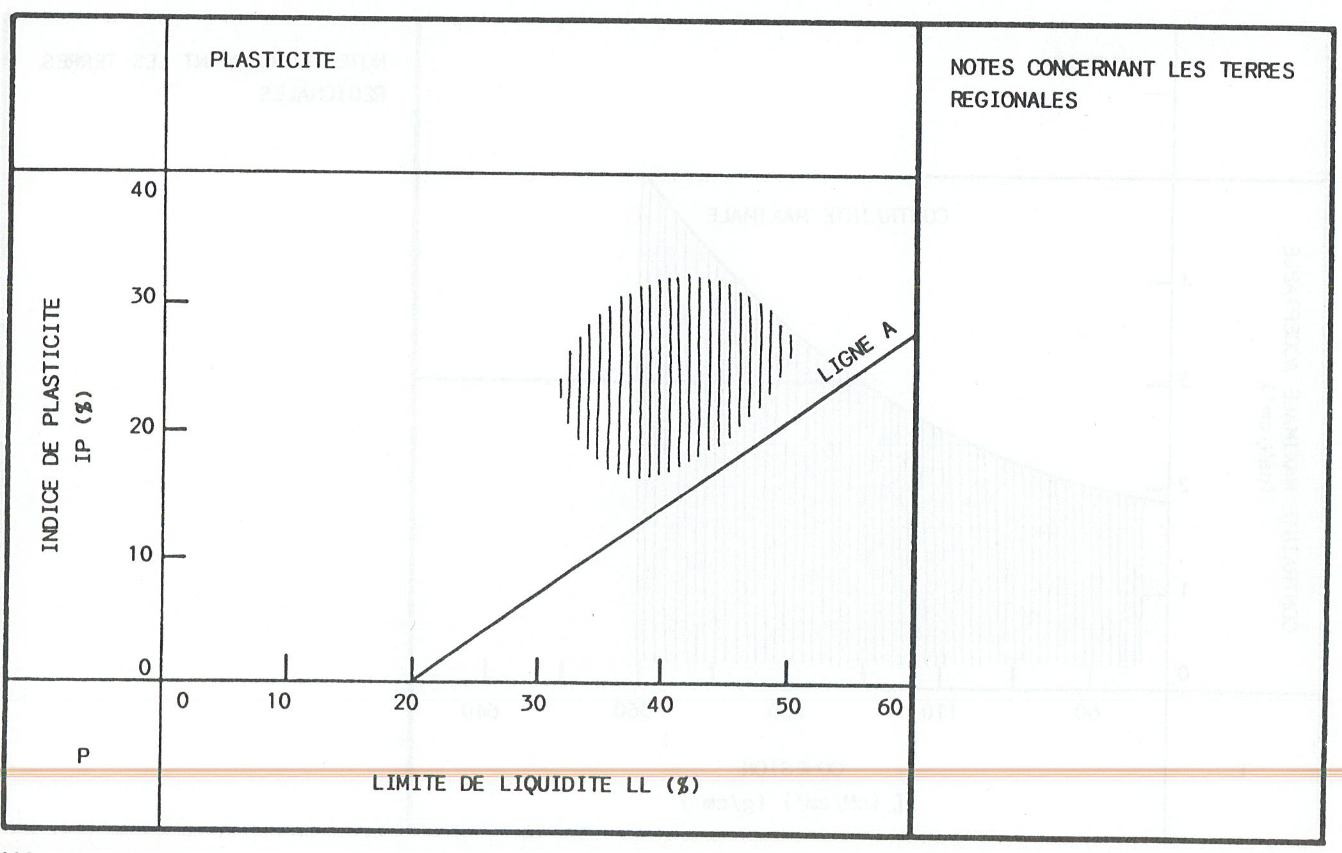


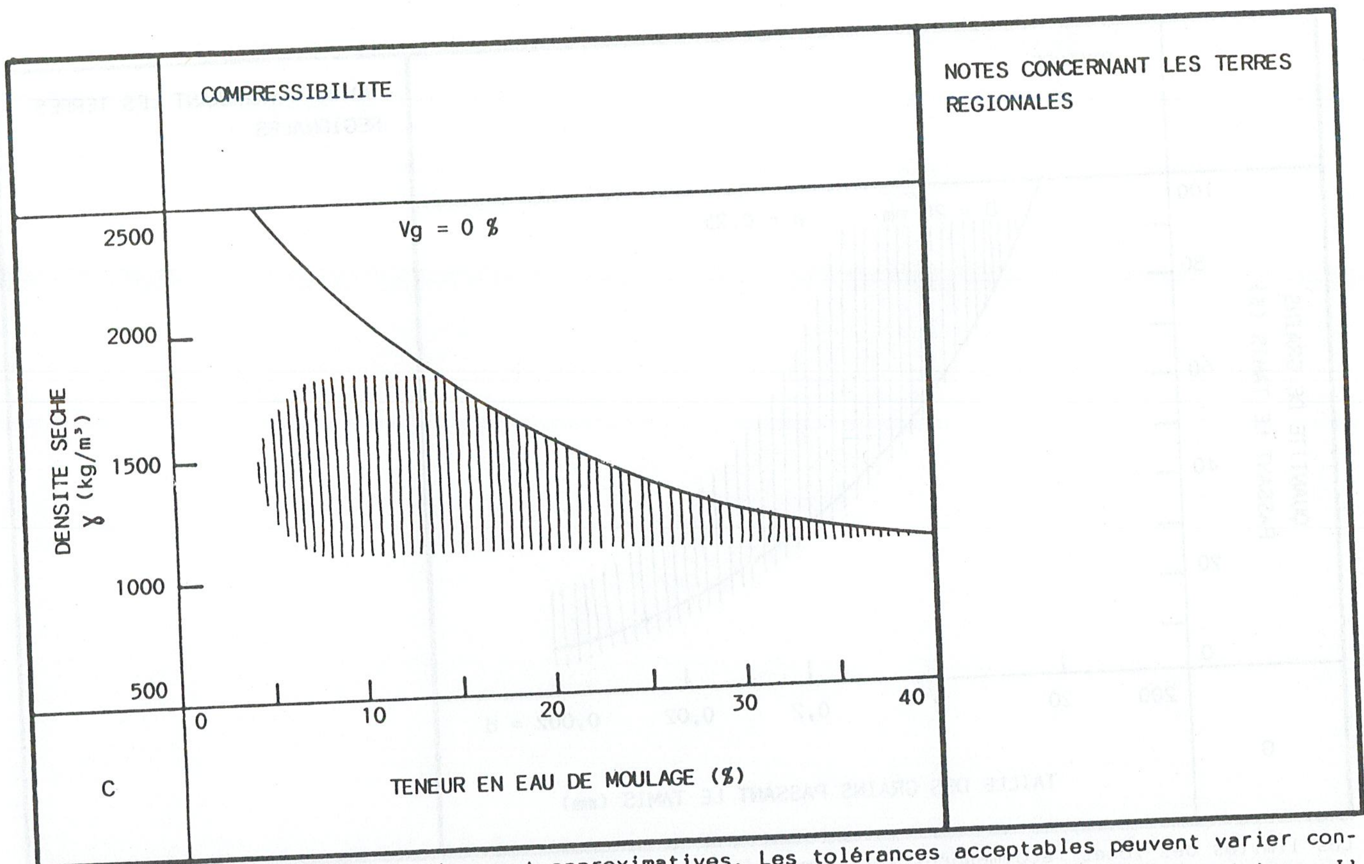
Les limites des zones recommandées sont approximatives. Les tolérances acceptables peuvent varier considérablement. L'état des connaissances actuelles ne permet pas d'appliquer des limites précises. Il est généralement admis que beaucoup de terres qui ne s'inscrivent pas dans les zones recommandées, donnent quand même des résultats acceptables en pratique. Toutefois les terres qui sont conformes, donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Les zones indiquées sont destinées à guider l'utilisateur et ne sont pas destinées à être appliquées comme des spécifications rigides.



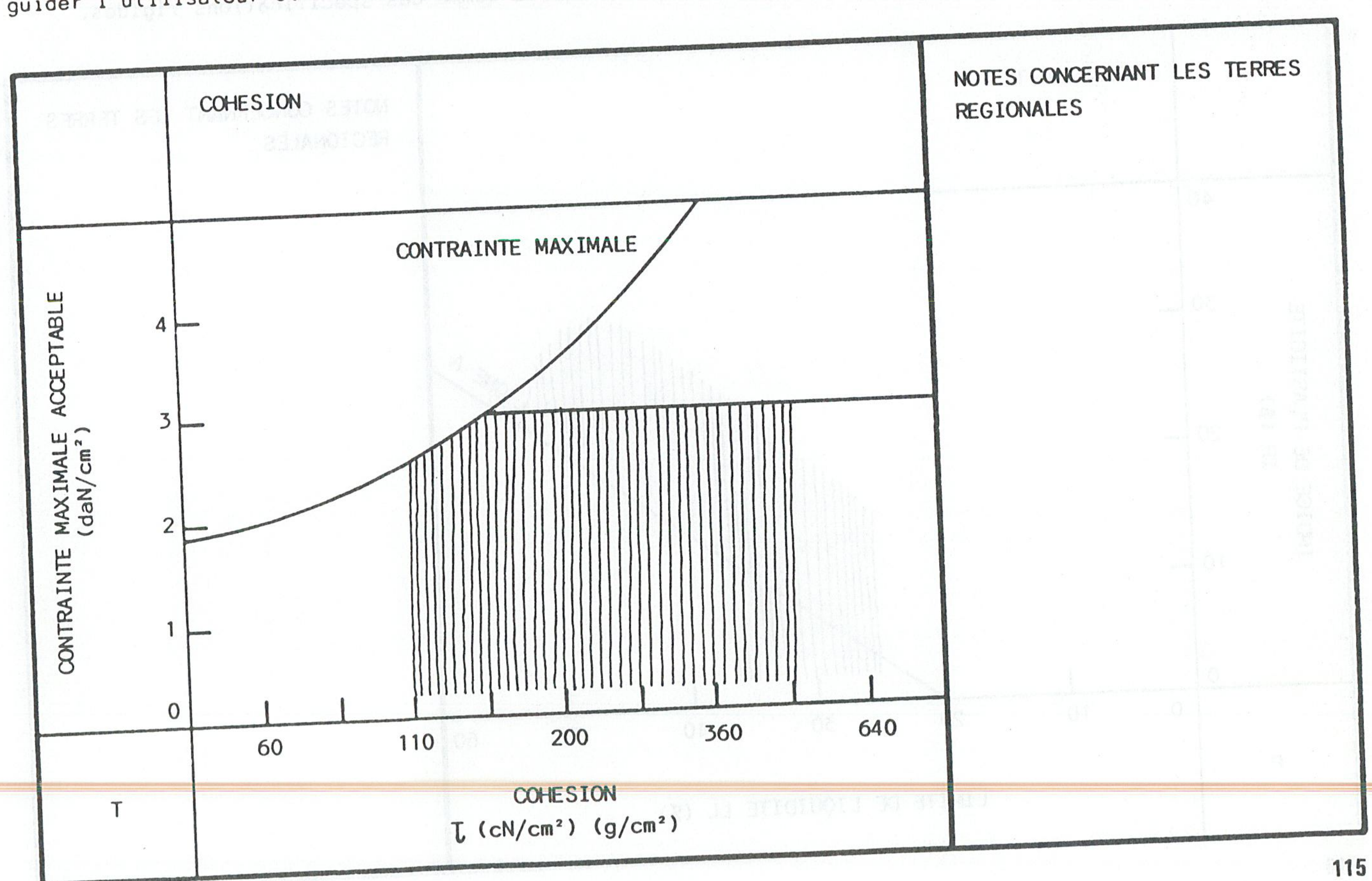


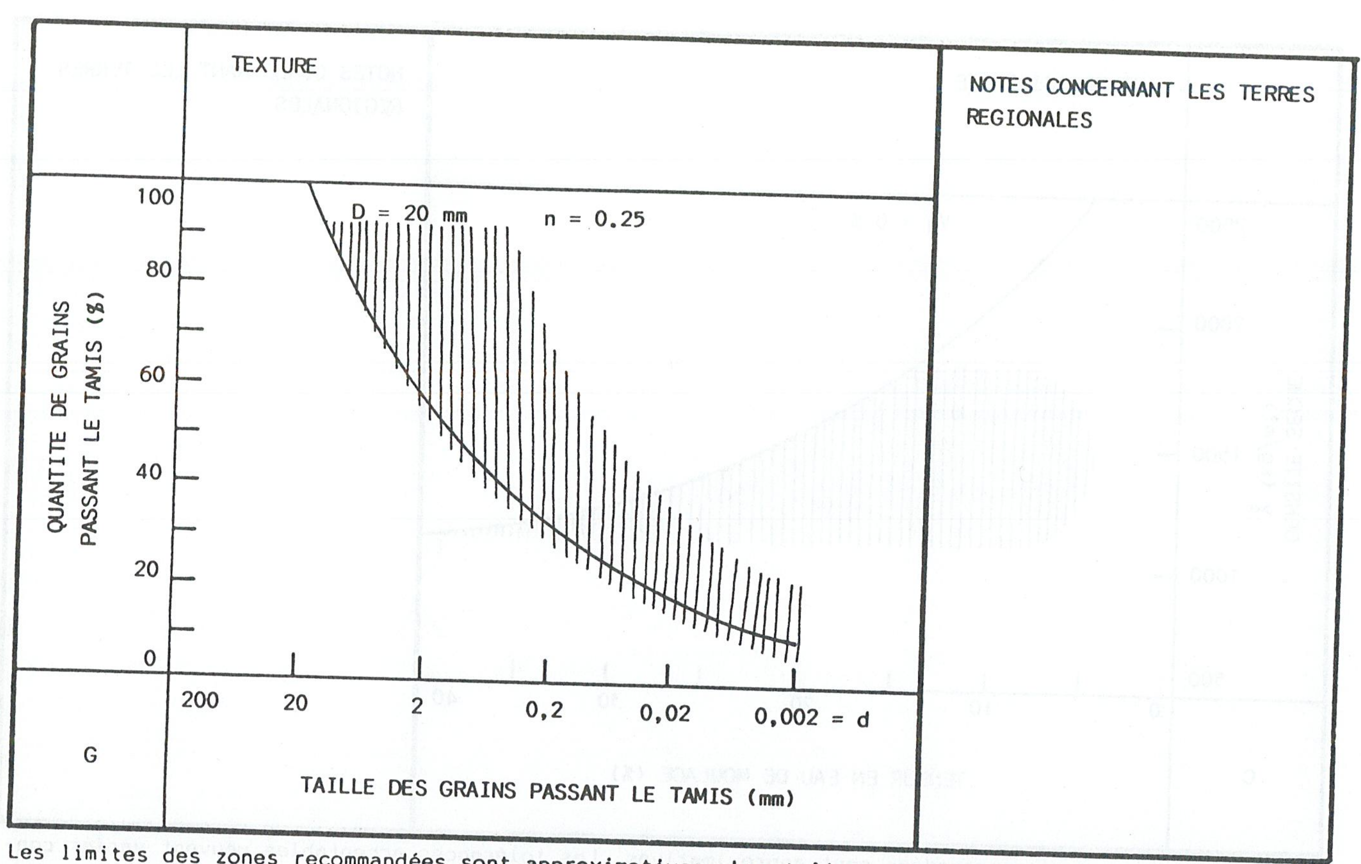
Les limites des zones recommandées sont approximatives. Les tolérances acceptables peuvent varier considérablement. L'état des connaissances actuelles ne permet pas d'appliquer des limites précises. Il est généralement admis que beaucoup de terres qui ne s'inscrivent pas dans les zones recommandées, donnent quand même des résultats acceptables en pratique. Toutefois les terres qui sont conformes, donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Les zones indiquées sont destinées à guider l'utilisateur et ne sont pas destinées à être appliquées comme des spécifications rigides.



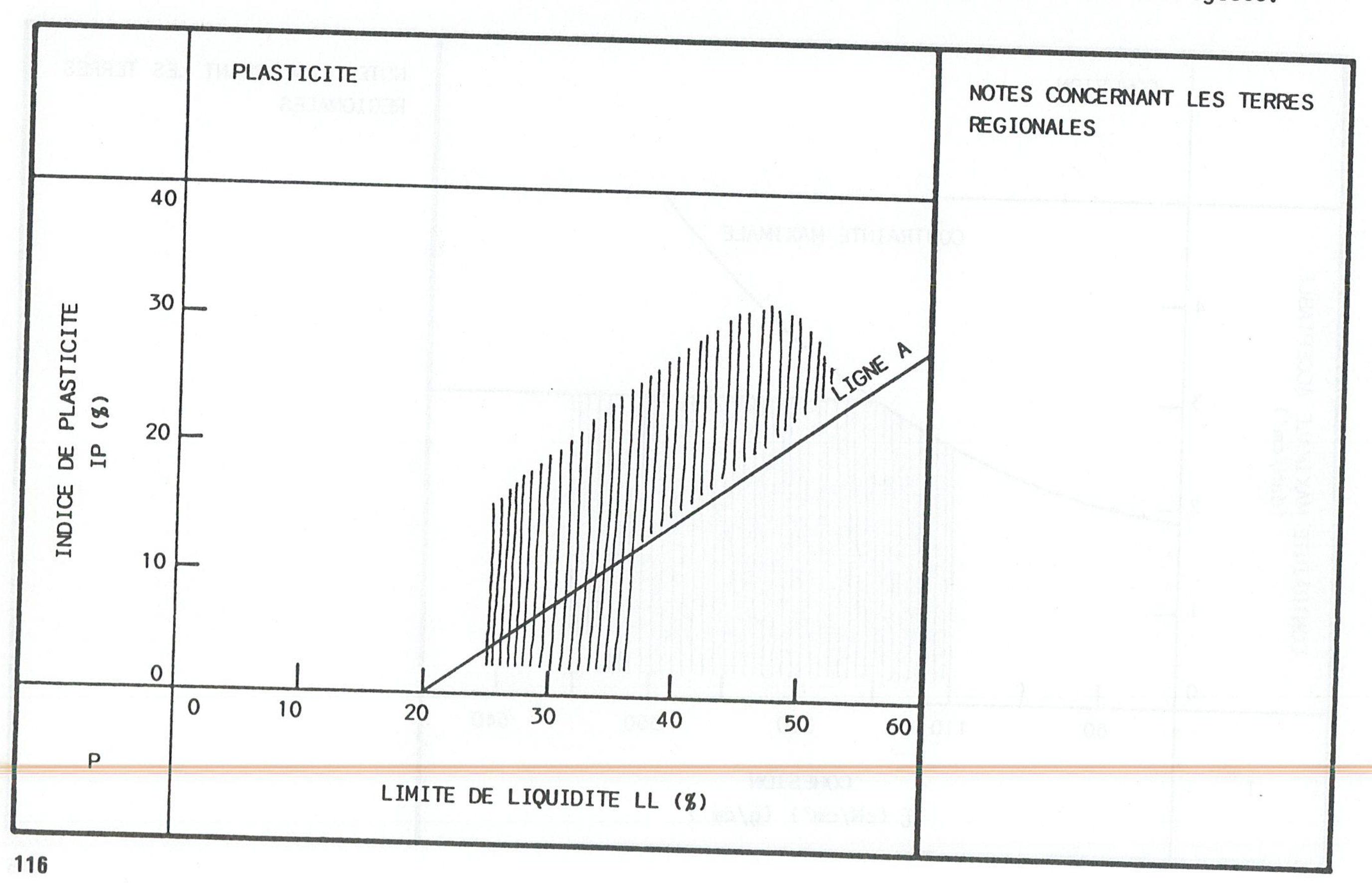


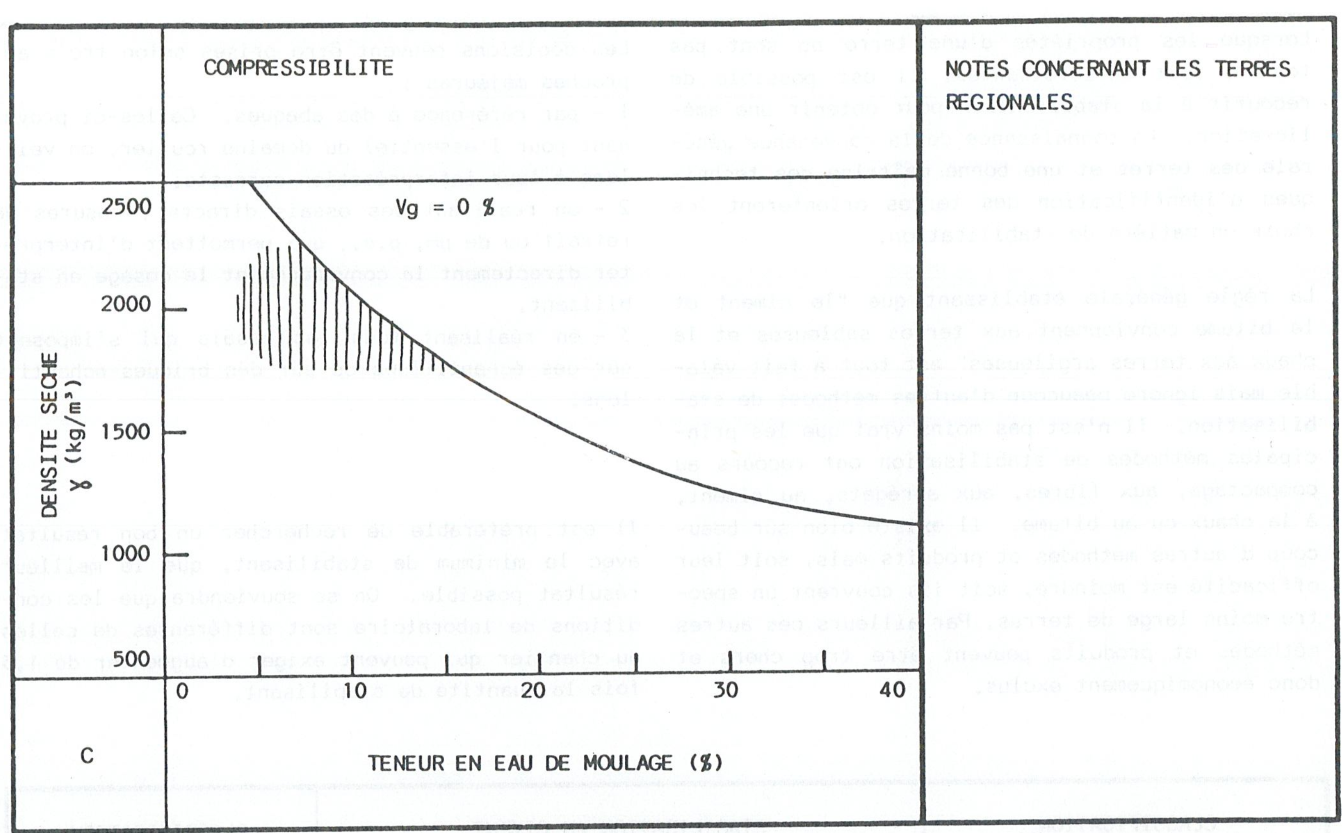
Les limites des zones recommandées sont approximatives. Les tolérances acceptables peuvent varier considérablement. L'état des connaissances actuelles ne permet pas d'appliquer des limites précises. Il est généralement admis que beaucoup de terres qui ne s'inscrivent pas dans les zones recommandées, donnent quand même des résultats acceptables en pratique. Toutefois les terres qui sont conformes, donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Les zones indiquées sont destinées à guider l'utilisateur et ne sont pas destinées à être appliquées comme des spécifications rigides.



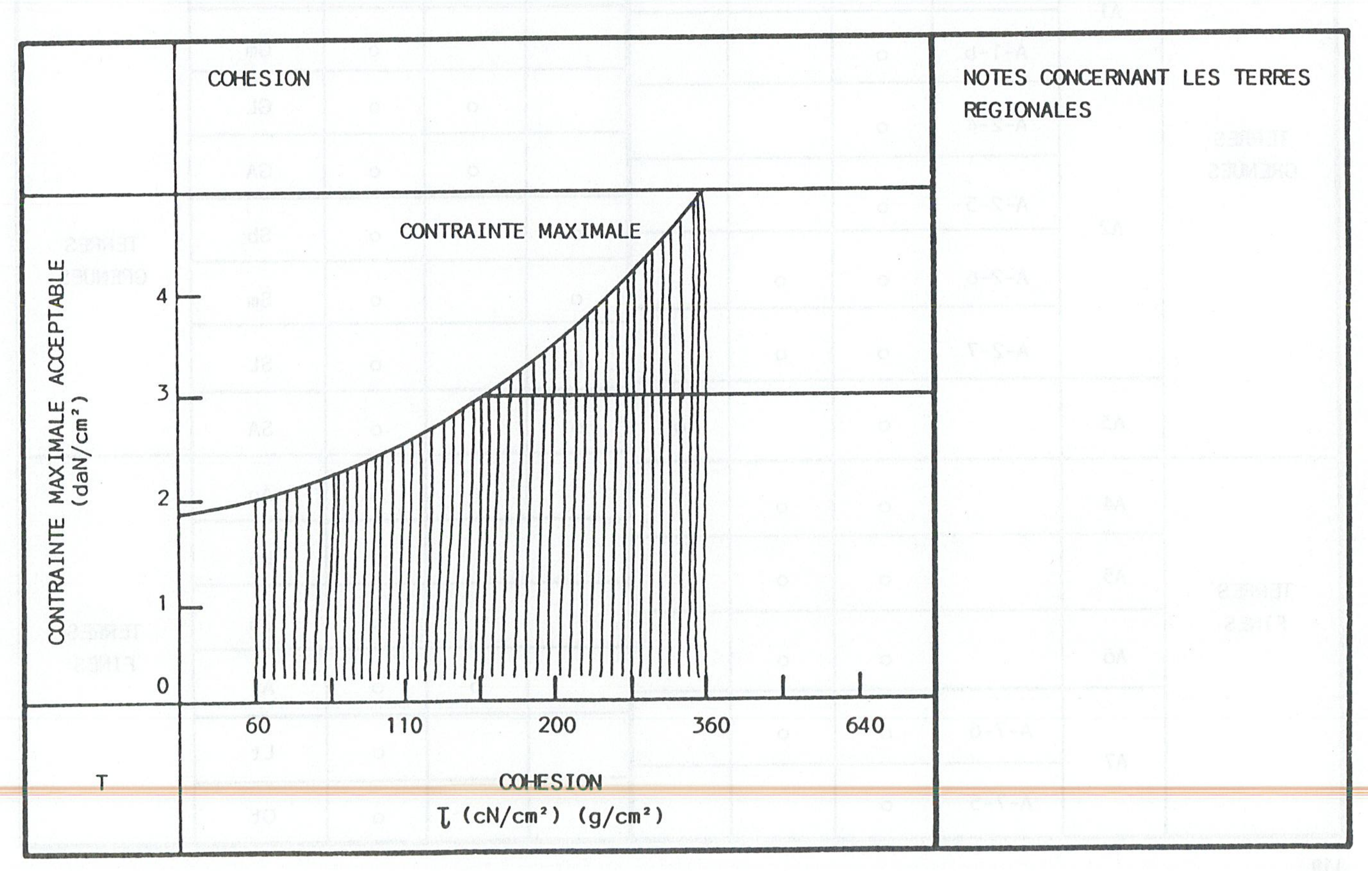


Les limites des zones recommandées sont approximatives. Les tolérances acceptables peuvent varier considérablement. L'état des connaissances actuelles ne permet pas d'appliquer des limites précises. Il est généralement admis que beaucoup de terres qui ne s'inscrivent pas dans les zones recommandées, donnent quand même des résultats acceptables en pratique. Toutefois les terres qui sont conformes, donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Les zones indiquées sont destinées à guider l'utilisateur et ne sont pas destinées à être appliquées comme des spécifications rigides.





Les limites des zones recommandées sont approximatives. Les tolérances acceptables peuvent varier considérablement. L'état des connaissances actuelles ne permet pas d'appliquer des limites précises. Il est généralement admis que beaucoup de terres qui ne s'inscrivent pas dans les zones recommandées, donnent quand même des résultats acceptables en pratique. Toutefois les terres qui sont conformes, donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Les zones indiquées sont destinées à guider l'utilisateur et ne sont pas destinées à être appliquées comme des spécifications rigides.



Lorsque les propriétés d'une terre ne sont pas tout à fait satisfaisantes, il est possible de recourir à la stabilisation pour obtenir une amélioration. La connaissance de la convenance générale des terres et une bonne maîtrise des techniques d'identification des terres orienteront les choix en matière de stabilisation.

La règle générale établissant que "le ciment et le bitume conviennent aux terres sableuses et la chaux aux terres argileuses" est tout à fait valable mais ignore beaucoup d'autres méthodes de stabilisation. Il n'est pas moins vrai que les principales méthodes de stabilisation ont recours au compactage, aux fibres, aux agrégats, au ciment, à la chaux ou au bitume. Il existe bien sûr beaucoup d'autres méthodes et produits mais, soit leur efficacité est moindre, soit ils couvrent un spectre moins large de terres. Par ailleurs ces autres méthodes et produits peuvent être trop chers et donc économiquement exclus.

Les décisions peuvent être prises selon trois approches majeures :

1 - par référence à des abaques. Celles-ci provenant pour l'essentiel du domaine routier, on veillera à leur interprétation correcte.

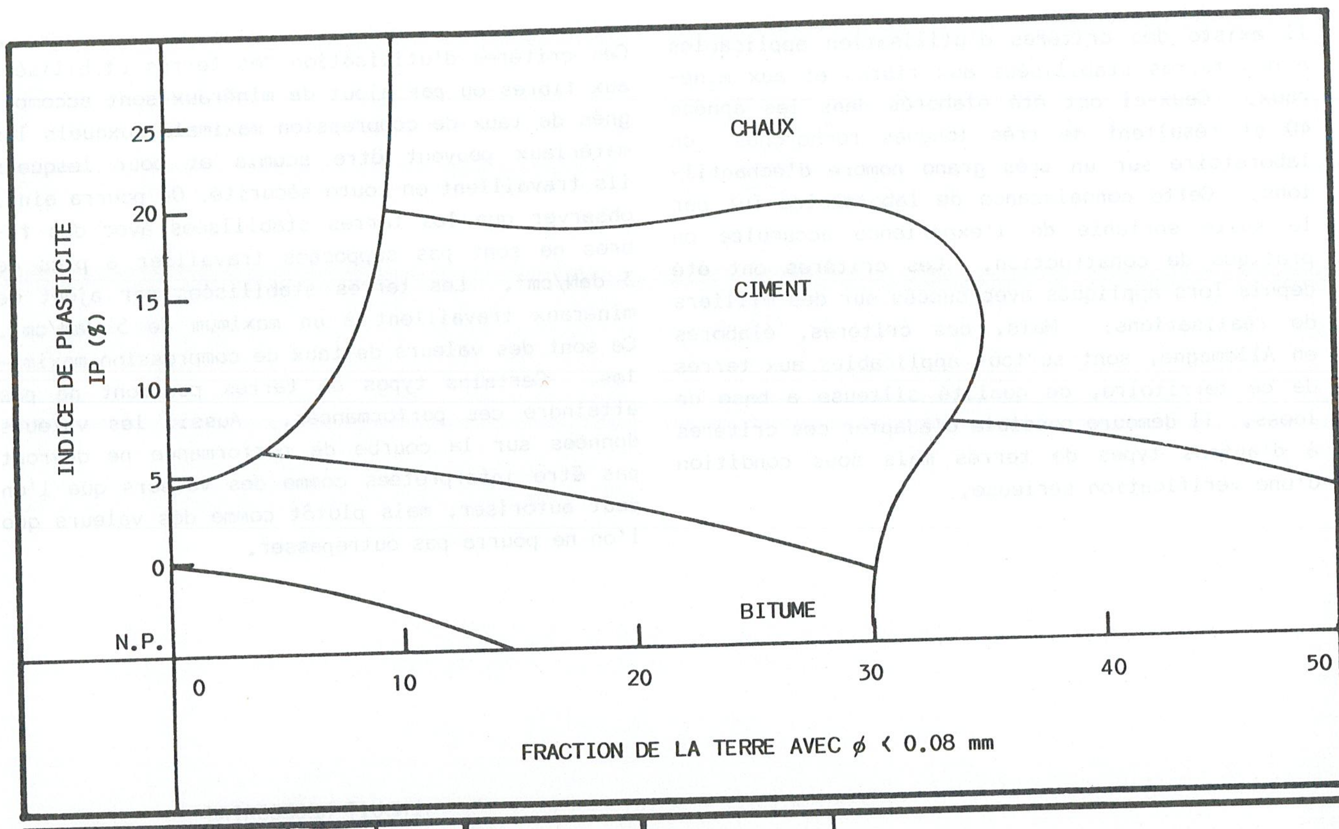
2 - en réalisant des essais directs : mesures de retrait ou de pH, p.e., qui permettent d'interpréter directement la convenance et le dosage en stabilisant.

3 - en réalisant tous les essais qui s'imposent sur des échantillons ou sur des briques-échantillons.

Il est préférable de rechercher un bon résultat avec le minimum de stabilisant, que le meilleur résultat possible. On se souviendra que les conditions de laboratoire sont différentes de celles du chantier qui peuvent exiger d'augmenter de 1,5 fois la quantité de stabilisant.

CLASSIFICATION DES TERRES	ASTM		STABILISATION AU CIMENT	CHAUX	BITUME
TERRES GRENUES	A1	A-1-a	o		
		A-1-b	o		
	A2	A-2-4	o		
		A-2-5	o		
		A-2-6	o	o	
		A-2-7	o	o	
	A3		o		o
TERRES FINES	A4		o	o	
	A5		o	o	
	A6		o	o	
	A7	A-7-6	o	o	
		A-7-5	o		

BITUME	CHAUX	STABILISATION AU CIMENT	USCS	CLASSIFICATION DES TERRES
		o	Gb	TERRES GRENUES
		o	Gm	
	o	o	GL	
	o	o	GA	
o		o	Sb	
o		o	Sm	
o		o	SL	
o		o	SA	
	o	o	Ap	TERRES FINES
		o	Lp	
		o	Op	
	o	o	At	
		o	Lt	
		o	Ot	

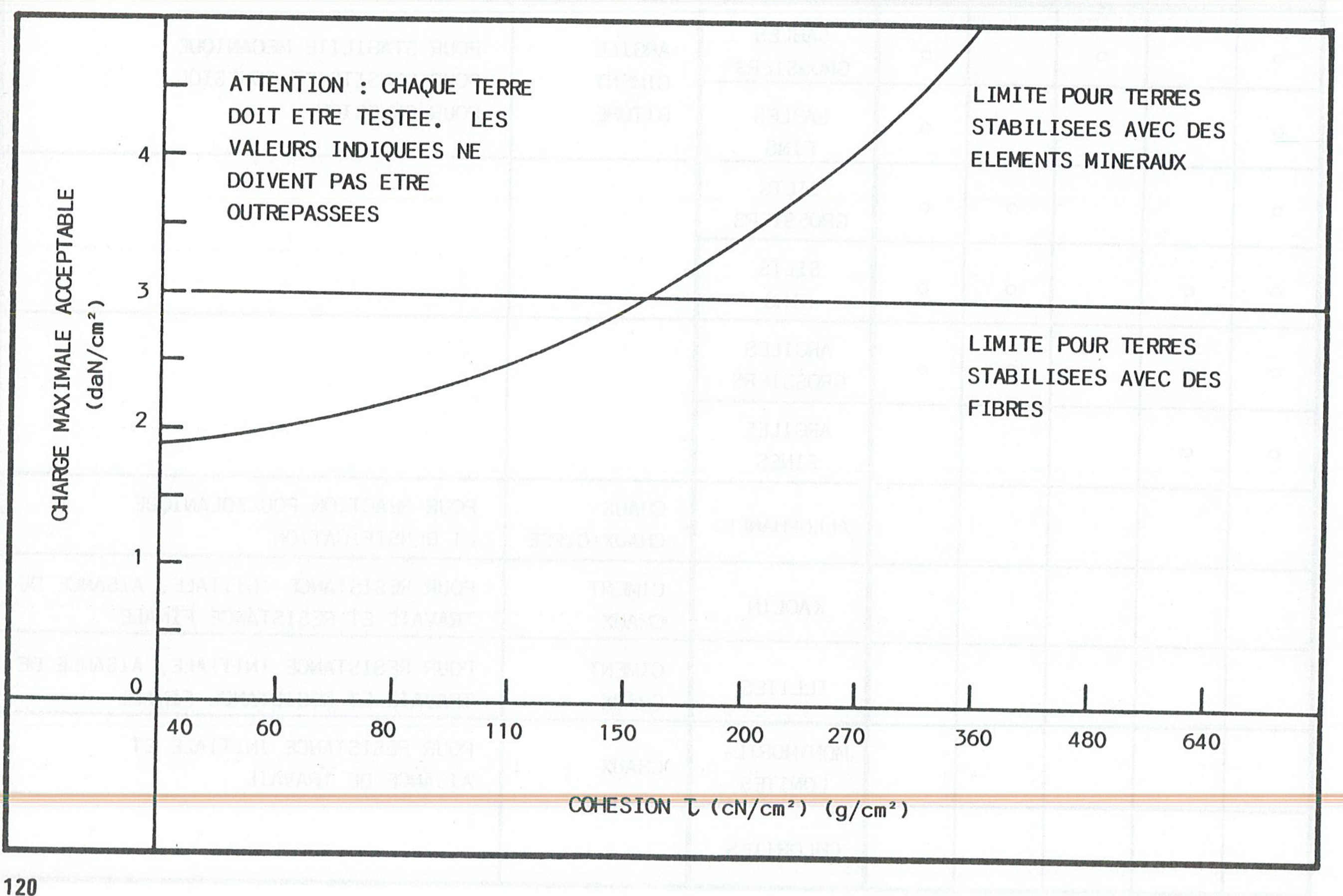


CIMENT	CHAUX	BITUME	ORGANIQUE POLYMERE	MECANIQUE	COMPOSANT DOMINANT DE LA TERRE	STABILISANT RECOMMANDE	RAISONS
o		o		o	SABLES GROSSIERS	ARGILE CIMENT BITUME	POUR STABILITE MECANIQUE POUR DENSITE ET COHESION POUR COHESION
o		o		o	SABLES FINS		
o			o	o	SILTS GROSSIERS		
o	o		o	o	SILTS FINS		
o	o		o	o	ARGILES GROSSIERS		
o	o				ARGILES FINES		
					ALLOPHANES	CHAUX CHAUX+GYPSE	POUR REACTION POUZZOLANIQUE ET DENSIFICATION
					KAOLIN	CIMENT CHAUX	POUR RESISTANCE INITIALE, AISANCE DE TRAVAIL ET RESISTANCE FINALE
					ILLITES	CIMENT CHAUX	POUR RESISTANCE INITIALE, AISANCE DE TRAVAIL ET RESISTANCE FINALE
					MONTMORIL-LONITES	CHAUX	POUR RESISTANCE INITIALE ET AISANCE DE TRAVAIL
					CHLORITES		

Il existe des critères d'utilisation applicables à des terres stabilisées aux fibres et aux minéraux. Ceux-ci ont été élaborés dans les années 40 et résultent de très longues recherches en laboratoire sur un très grand nombre d'échantillons. Cette connaissance de laboratoire fut par la suite enrichie de l'expérience accumulée en pratique de construction. Ces critères ont été depuis lors appliqués avec succès sur des milliers de réalisations. Mais, ces critères, élaborés en Allemagne, sont surtout applicables aux terres de ce territoire, de qualité silteuse à base de loess. Il demeure possible d'adapter ces critères à d'autres types de terres mais sous condition d'une vérification sérieuse.

Ces critères d'utilisation des terres stabilisées aux fibres ou par ajout de minéraux sont accompagnés de taux de compression maximale auxquels les matériaux peuvent être soumis et pour lesquels ils travaillent en toute sécurité. On pourra ainsi observer que les terres stabilisées avec des fibres ne sont pas supposées travailler à plus de 3 daN/cm². Les terres stabilisées par ajout de minéraux travaillent à un maximum de 5 daN/cm². Ce sont des valeurs de taux de compression maximales. Certains types de terres pourront ne pas atteindre ces performances. Aussi, les valeurs données sur la courbe de performance ne devront pas être interprétées comme des valeurs que l'on peut autoriser, mais plutôt comme des valeurs que l'on ne pourra pas outrepasser.

*	ENDUIT NECESSAIRE
**	AJOUTER DU SABLE ET TESTER
o	AJOUTER ARGILE AU MORTIER
oo	EFFECTUER ESSAIS PRELIMINAIRES
()	EVENTUELLEMENT
-	PAS RECOMMANDE



RESULTATS DE L'ESSAI DE COHESION T (cN/cm²) (g/cm²)	STABILISATION AVEC FIBRES (kg/m³ TERRE FOISONNEE)					STABILISATION AVEC ELEMENTS MINERAUX (VOLUME)			
	PISE LONGUEUR FIBRE 5 - 10 cm	ADOBE LONGUEUR FIBRE 8 - 12 cm	BLOCS COMPRIMES LONGUEUR FIBRE 4 - 12 cm	BAUGE LONGUEUR FIBRE 30 - 40 cm	TERRE PAILLE LONGUEUR FIBRE 30 - 40 cm	PISE ø max=60 mm	BLOCS COMPRESSES ø max=20 mm	TERRE COULEE (700 kg/m³) kg CENDRES/m³ FOISONNE	TERRE COULEE (300 kg/m³) kg PONCE/m³ FOISONNE
40 - 60	*			-	45 - 70	o *		-	-
60 - 80	*		4	-	45 - 70	o *		-	-
80 - 110	*		4	(20)	45 - 70	o *		(125)	(60)
110 - 150	4 - 5*	3 - 5	4 - 5	22 - 23	45 - 70	1:5 - 1:4*	1:5 - 1:4	200	90
150 - 200	6 - 8*	6 - 8	6 - 8	24 - 25	50 - 70	1:4 - 1:3.5	1:4 - 1:3.5	350	150
200 - 270	8 - 11	9 - 10	8 - 10	25 - 26	60 - 70	1:3 - 1:2	1:3 - 1:2	500	225
270 - 360	10 - 14	12 - 14	10 - 12	26 - 28	70	1:2 - 1:1.5	1:2 - 1:1.5	700	300
360 - 480	(14) oo	15	(12) oo	**	80	(1:1.5) oo	**	1000	450
480 - 640	**	**	**	**	90	**	**	1400	600
640 - PLUS	**	**	**	**	90	**	**	1400	600

Presque toutes les terres, exceptées celles qui sont trop chargées en matières organiques peuvent être traitées au ciment et voir ainsi leurs propriétés nettement améliorées. Les terres riches en sels sont également difficiles à stabiliser au ciment mais très souvent, une augmentation du taux de ciment apporte de bons résultats. Les terres qui ont une fraction argileuse importante se mélangent difficilement et exigent des quantités de ciment élevées. Pour des conditions de laboratoire, très soignées au stade du mélange, on pourra obtenir de bons résultats avec des terres argileuses. Mais, en pratique, on évite de stabiliser au ciment une terre argileuse dont la limite de liquidité est supérieure à 50 et la teneur en argile supérieure à 30%. Un pré-traitement de ces terres très argileuses,à la chaux hydratée, pourra favoriser l'obtention de bons résultats avec du ciment ajouté dans un deuxième temps. De nombreux essais donnent des indications sur la convenance et le dosage du ciment.

- **ESSAI D'ABRASION** : le dosage en ciment doit réduire les pertes de matière à 3 % après 50 cycles, ce qui est une excellente performance.

- **ESSAI D'EROSION** : le dosage doit permettre une limitation de la profondeur moyenne des trous à 15 mm, performance excellente pour cet essai très dur.

- **HUMIDIFICATION-SECHAGE** : un dosage optimal doit réduire les pertes de matière à 10 % : excellente performance pour cet essai très dur.

- **GEL-DEGEL** : un dosage optimal doit réduire les pertes de matière à 10 % : excellente performance pour cet essai trop dur.

- **RETRAIT** : (d'après le test d'Alcock).

Retrait linéaire (mm)	Ciment : terre (vol)
moins de 15	1 : 18
de 15 à 30	1 : 16
de 30 à 45	1 : 14
de 45 à 60	1 : 12

Ces valeurs sont valables pour des terres comprimées à un maximum de 40 daN/cm². La quantité de ciment peut être réduite d'au moins 30 % pour des terres comprimées à 100 daN/cm².

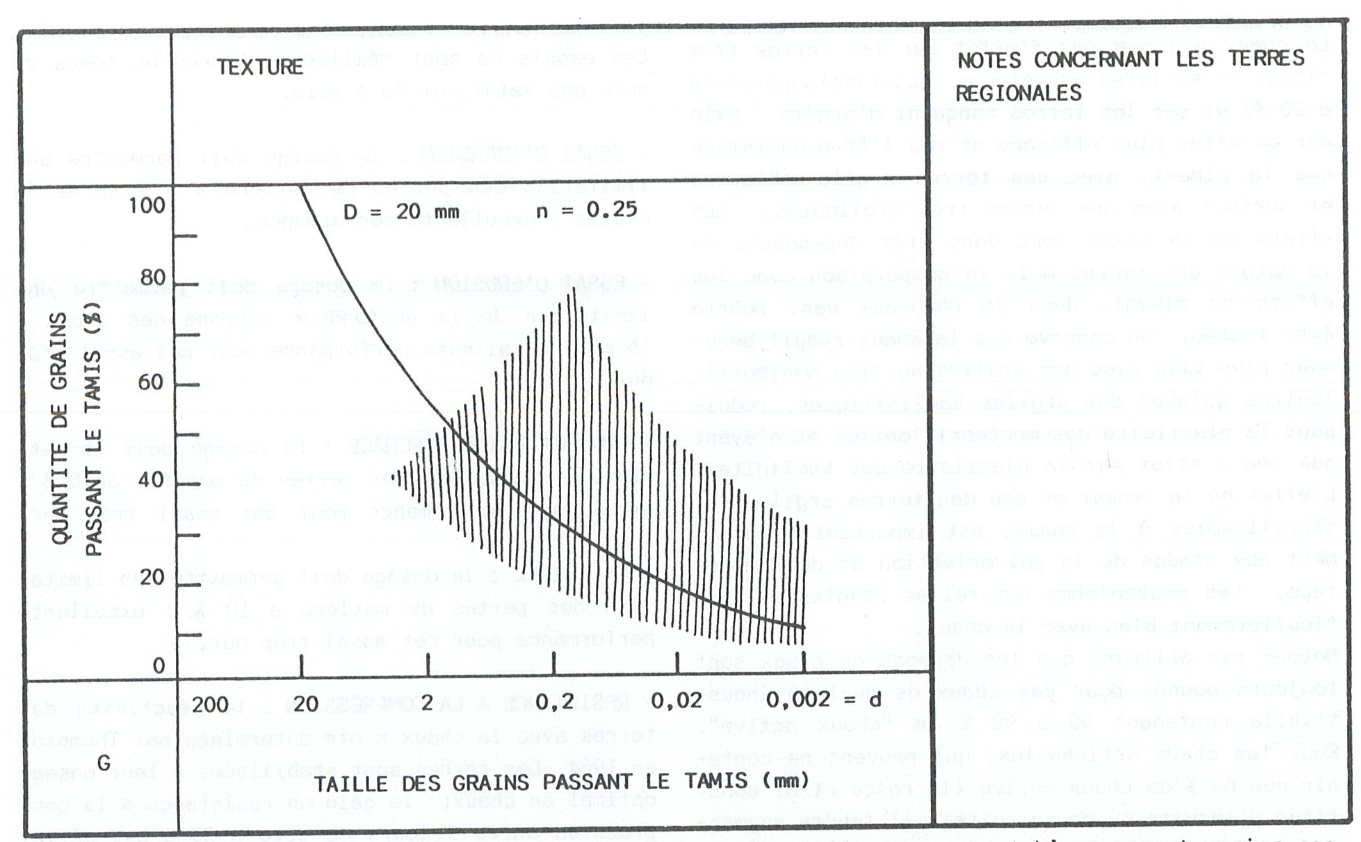
- **MATIERES ORGANIQUES** :

Si pH > 7 (alcalin) : des terres calcaires, brunes alcalines et certaines terres à gley peuvent être stabilisées à 10 % de ciment; des taux de 1 à 2 % de matières organiques ne sont en général pas gênants.

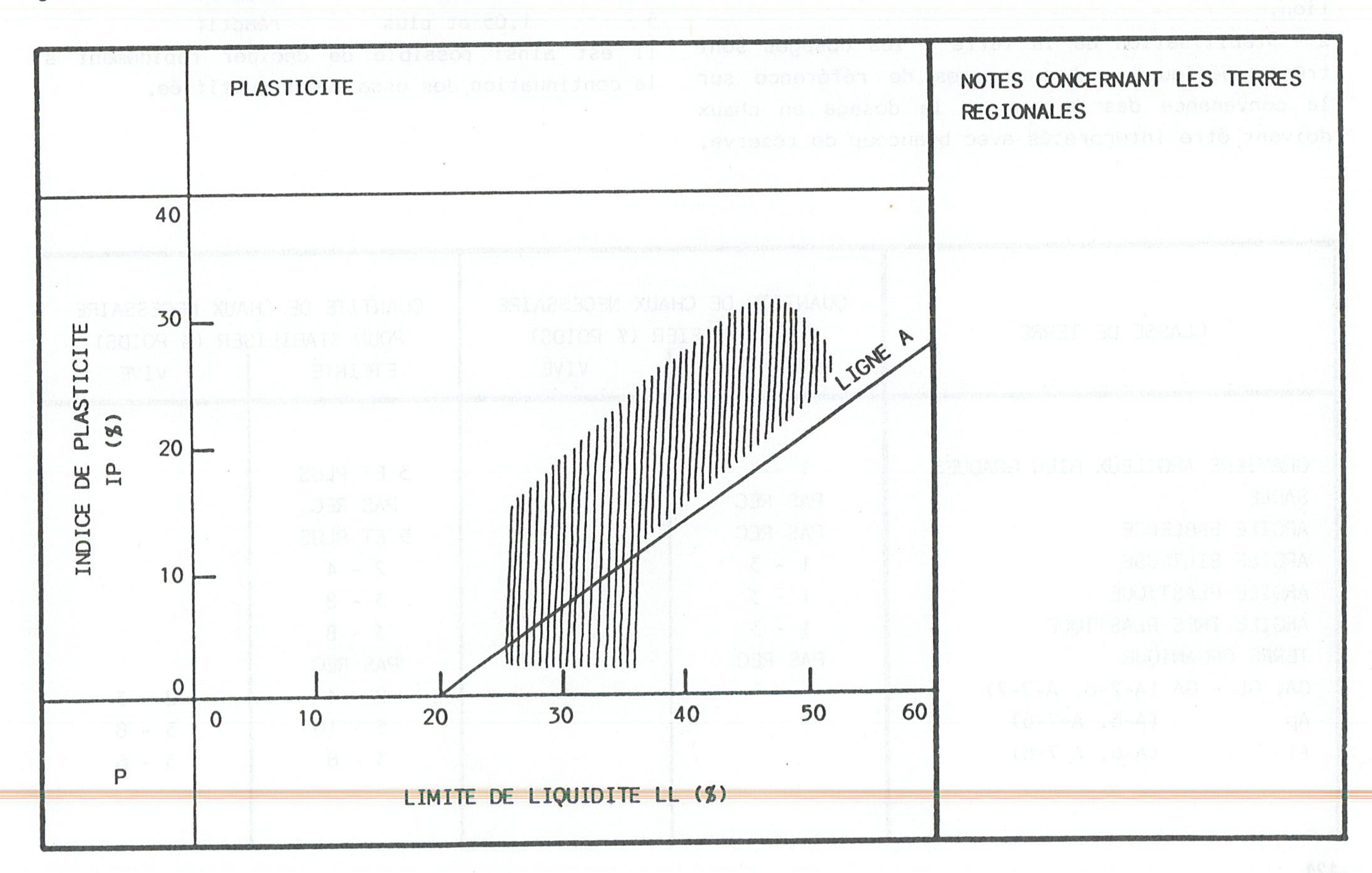
Si pH < 7 (acide) : les terres à gley conviennent, stabilisées à 10 % si la teneur en matières organiques est inférieure à 1 %. Les terres podzoliques et les terres brunes acides peuvent éventuellement convenir si elles contiennent moins de 1 % de matières organiques. Si l'on décèle quelques anomalies,un pré-traitement au chlorure de calcium (1 à 2 %) pourra amener quelques améliorations.

CLASSE DE TERRE AASHO	CLASSE DE TERRE USCS	QUANTITE DE CIMENT * % EN VOLUME	% EN VOLUME	POIDS (%) POUR ESSAIS PROCTOR	POIDS (%) POUR ESSAIS GEL - DEGEL
A-1-a	Gb, Gm, GL, Sb, Sm, SL	5 - 7	3 - 5	5	3 - 5 - 7
A-1-b	GL, Gm, SL, Sm	7 - 9	5 - 8	6	4 - 6 - 8
A-2	GL, GA, SL, SA	7 - 10	5 - 9	7	5 - 7 - 9
A-3	Sm	8 - 12	7 - 11	9	7 - 9 - 11
A-4	Ap, Lp	8 - 12	7 - 12	10	8 - 10 - 12
A-5	Lp, Lt, Ot	8 - 12	8 - 13	10	8 - 10 - 12
A-6	Ap, At	10 - 14	9 - 15	12	10 - 12 - 14
A-7	Ot, Lt, At	10 - 14	10 - 16	13	11 - 13 - 15

* Pour la plupart des terres de l'horizon A, la quantité de ciment doit être augmentée de 4 points pourcentils si la terre est de couleur gris foncé ou grise, et de 6 points pourcentils, si la terre est de couleur noire.



Les limites des zones recommandées sont approximatives. Les tolérances acceptables peuvent varier considérablement. L'état des connaissances actuelles ne permet pas d'appliquer des limites précises. Il est généralement admis que beaucoup de terres qui ne s'inscrivent pas dans les zones recommandées, donnent quand même des résultats acceptables en pratique. Toutefois les terres qui sont conformes, donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Les zones indiquées sont destinées à guider l'utilisateur et ne sont pas destinées à être appliquées comme des spécifications rigides.



La chaux n'a que peu d'effet sur les terres très riches en matières organiques (quantité supérieure à 20 %) et sur les terres manquant d'argile. Elle est en effet plus efficace et peu l'être davantage que le ciment, avec des terres argilo-sableuses et surtout avec des terres très argileuses. Les effets de la chaux sont donc très dépendants de la nature des terres mais la comparaison avec les effets du ciment, dans de nombreux cas, pourra être tentée. On observe que la chaux réagit beaucoup plus vite avec des argiles du type montmorillonites qu'avec des argiles kaolinitiques, réduisant la plasticité des montmorillonites et n'ayant que peu d'effet sur la plasticité des kaolinites.
L'effet de la teneur en eau des terres argileuses, stabilisables à la chaux, est important, notamment aux stades de la pulvérisation et du compactage. Les pouzzolanes naturelles réagissent particulièrement bien avec la chaux.
Notons par ailleurs que les dosages en chaux sont toujours donnés pour des chaux de qualité industrielle contenant 90 à 99 % de "chaux active". Pour les chaux artisanales, qui peuvent ne contenir que 60 % de chaux active (le reste étant constitué d'incuits ou de surcuits), il faudra augmenter ces dosages. On retiendra deux modes principaux d'emploi de la chaux pour améliorer les performances d'une terre :
1 - Modification de la terre: la chaux est ajoutée jusqu'au point de fixation. Cette opération réduit la plasticité de la terre et active sa floculation.
2 - Stabilisation de la terre : les dosages sont très supérieurs. Les abaques de référence sur la convenance des terres et le dosage en chaux doivent être interprétés avec beaucoup de réserve.

Les essais ne sont réalisés qu'après un temps de cure des matériaux de 3 mois.

- **ESSAI D'ABRASION** : le dosage doit permettre une limitation des pertes de matière à 3 % après 50 cycles : excellente performance.

- **ESSAI D'EROSION** : le dosage doit permettre une limitation de la profondeur moyenne des trous à 15 mm : excellente performance pour cet essai très dur.

- **HUMIDIFICATION-SECHAGE** : le dosage doit permettre une limitation des pertes de matière à 10 % : excellente performance pour cet essai trop dur.

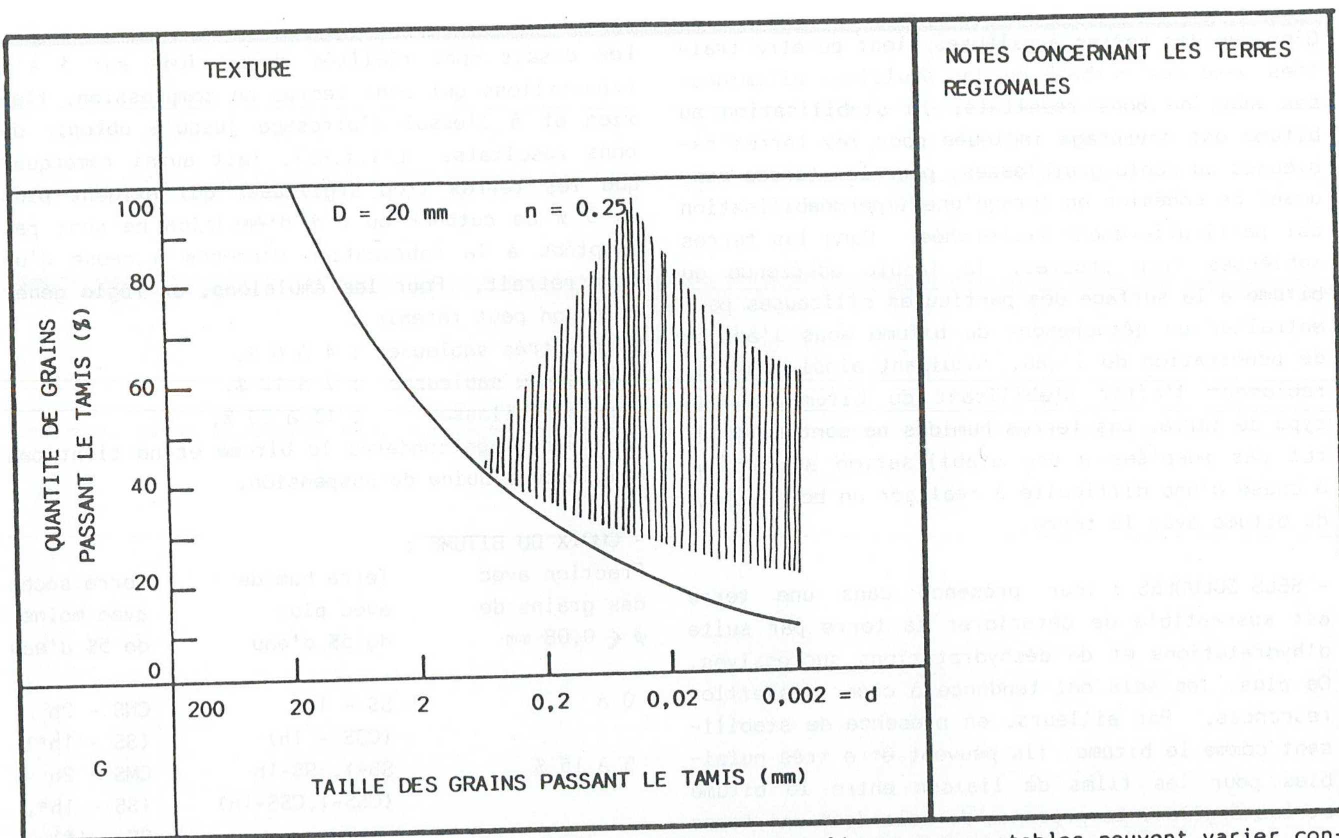
- **GEL-DEGEL** : le dosage doit permettre une limitation des pertes de matière à 10 % : excellente performance pour cet essai trop dur.

- **RESISTANCE A LA COMPRESSION** : la réactivité des terres avec la chaux a été déterminée par Thompson en 1964. Des terres sont stabilisées à leur dosage optimal en chaux; le gain en résistance à la compression après 7 jours de cure à 23°C est défini comme la réactivité de la terre avec la chaux :

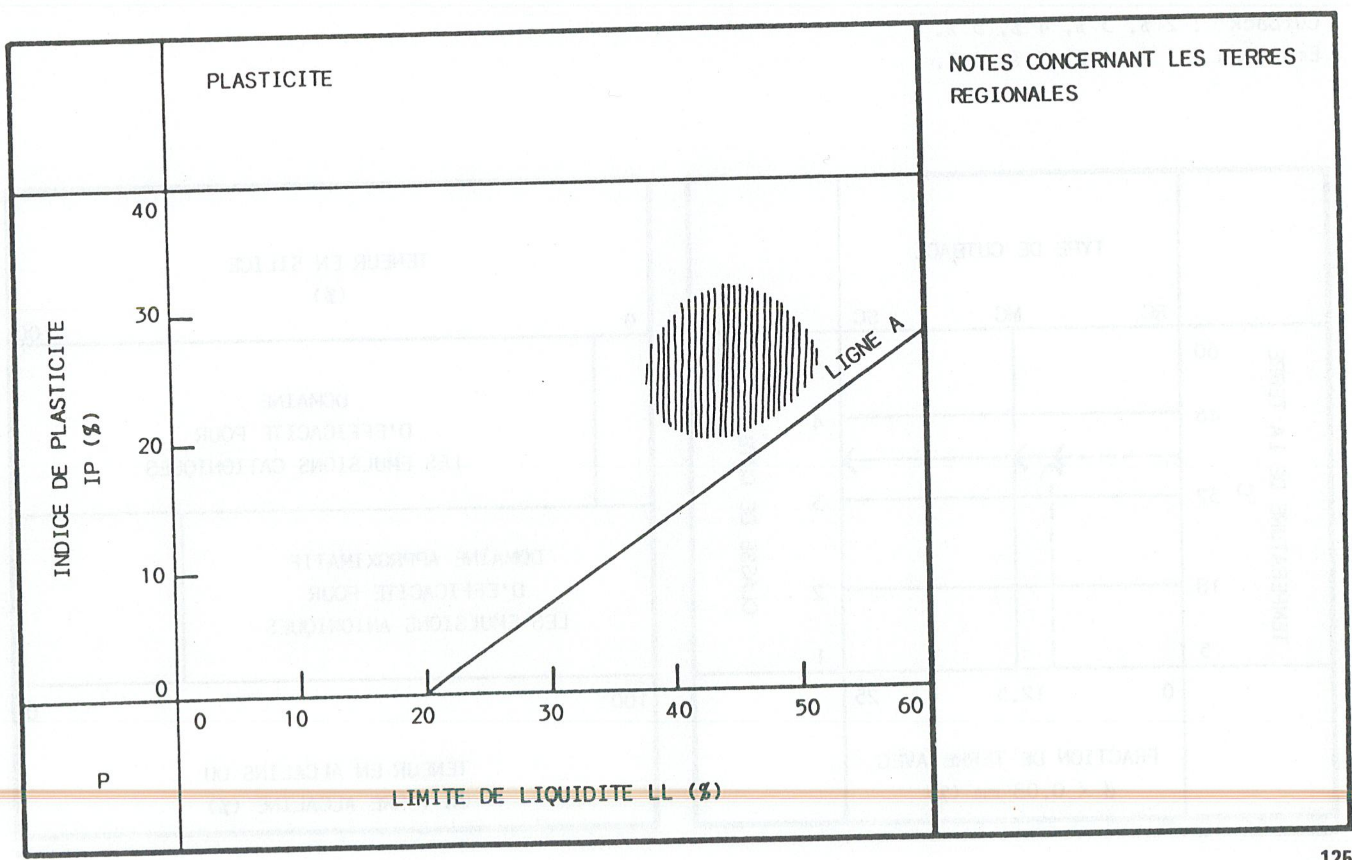
Groupe	Gain (daN/cm²)	Réactivité
1	1	non réactif
2	1 à 3,5	non réactif
3	3,5 à 7	réactif
4	7 à 1,05	réactif
5	1,05 et plus	réactif

Il est ainsi possible de décider rapidement si la continuation des essais est justifiée.

CLASSE DE TERRE	QUANTITE DE CHAUX NECESSAIRE POUR MODIFIER (% POIDS)		QUANTITE DE CHAUX NECESSAIRE POUR STABILISER (% POIDS)	
	ETEINTE	VIVE	ETEINTE	VIVE
GRAVIERS ARGILEUX BIEN GRADUES	1 - 3		3 ET PLUS	
SABLE	PAS REC		PAS REC	
ARGILE SABLEUSE	PAS REC		5 ET PLUS	
ARGILE SILTEUSE	1 - 3		2 - 4	
ARGILE PLASTIQUE	1 - 3		3 - 8	
ARGILE TRES PLASTIQUE	1 - 3		3 - 8	
TERRE ORGANIQUE	PAS REC		PAS REC	
GA, GL - GA (A-2-6, A-2-7)			2 - 4	2 - 3
Ap (A-6, A-7-6)			5 - 10	3 - 8
At (A-6, A-7-6)			3 - 8	3 - 6



Les limites des zones recommandées sont approximatives. Les tolérances acceptables peuvent varier considérablement. L'état des connaissances actuelles ne permet pas d'appliquer des limites précises. Il est généralement admis que beaucoup de terres qui ne s'inscrivent pas dans les zones recommandées, donnent quand même des résultats acceptables en pratique. Toutefois les terres qui sont conformes, donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Les zones indiquées sont destinées à guider l'utilisateur et ne sont pas destinées à être appliquées comme des spécifications rigides.



Bien que des terres argileuses aient pu être traitées avec des cutback ou des émulsions bitumineuses avec de bons résultats, la stabilisation au bitume est davantage indiquée pour les terres sableuses ou sablo-graveleuses, pour les terres manquant de cohésion ou lorsqu'une imperméabilisation est particulièrement recherchée. Dans les terres sableuses trop propres, la faible adhérence du bitume à la surface des particules siliceuses peut entraîner un détachement du bitume sous l'action de pénétration de l'eau, réduisant ainsi considérablement l'effet stabilisant du bitume sur ce type de terre. Les terres humides ne sont en général pas adaptées à une stabilisation au bitume, à cause d'une difficulté à réaliser un bon mélange du bitume avec la terre.

- SELS SOLUBLES : leur présence dans une terre est susceptible de détériorer la terre par suite d'hydratations et de déshydratations successives. De plus, les sels ont tendance à créer des efflorescences. Par ailleurs, en présence de stabilisant comme le bitume, ils peuvent être très nuisibles pour les films de liaison entre le bitume et les argiles. La présence de sels dans une terre stabilisable au bitume ne doit pas dépasser 0,2 %, de préférence.

- DOSAGE : l'I.I.H.T. (Californie, U.S.A.) recommande pour l'adobe, de réaliser des tests en augmentant progressivement le dosage en bitume comme il suit :

Cutback : 2 %, 3 %, 4 %, 5 %.
Emulsion : 3 %, 4 %, 5 %, 6 %.

Les essais sont réalisés chaque fois sur 3 à 4 échantillons qui sont testés en compression, flexion et à l'essai d'arrosage jusqu'à obtenir de bons résultats. L'I.I.H.T. fait aussi remarquer que les terres trop argileuses qui exigent plus de 3 % de cutback ou 6 % d'émulsion ne sont pas adaptées à la fabrication d'adobes à cause d'un fort retrait. Pour les émulsions, en règle générale, on peut retenir :

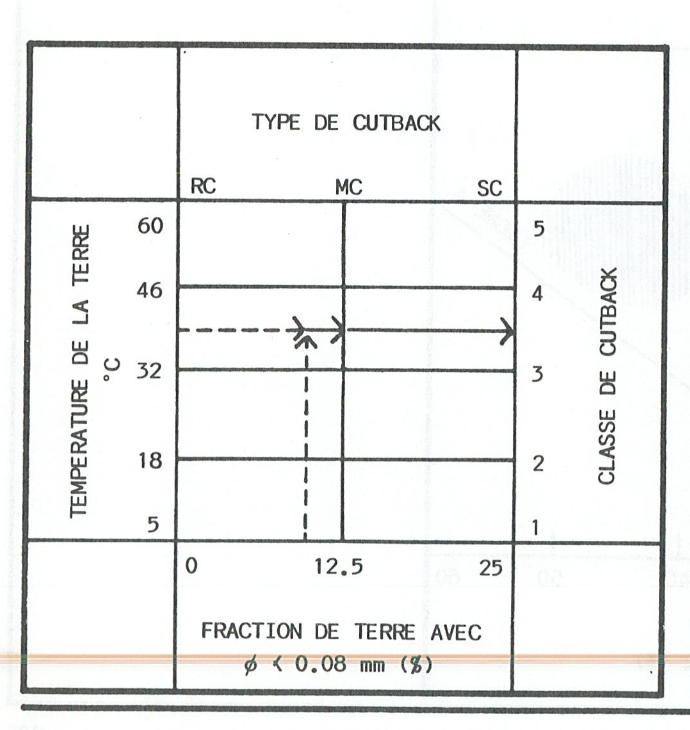
Terres très sableuses : 4 à 6 %.
Terres peu sableuses : 7 à 12 %.
Terres argileuses : 13 à 20 %.

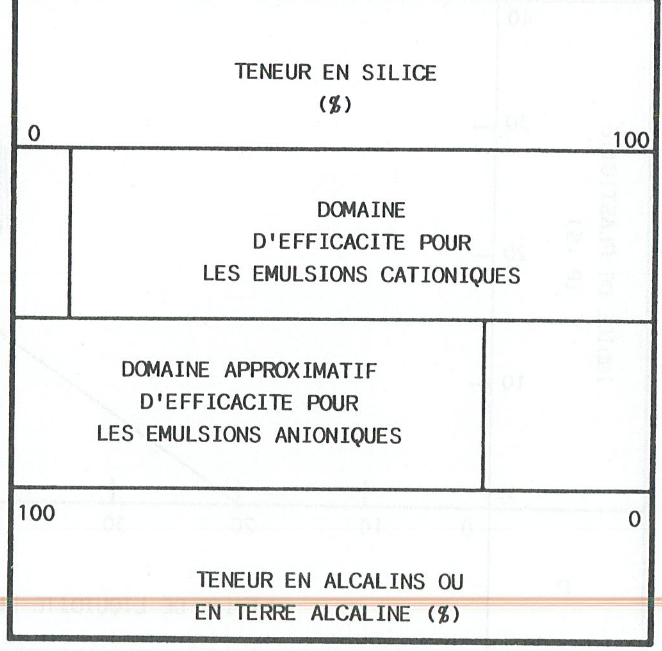
Le pourcentage concerne le bitume et ne tient pas compte du liquide de suspension.

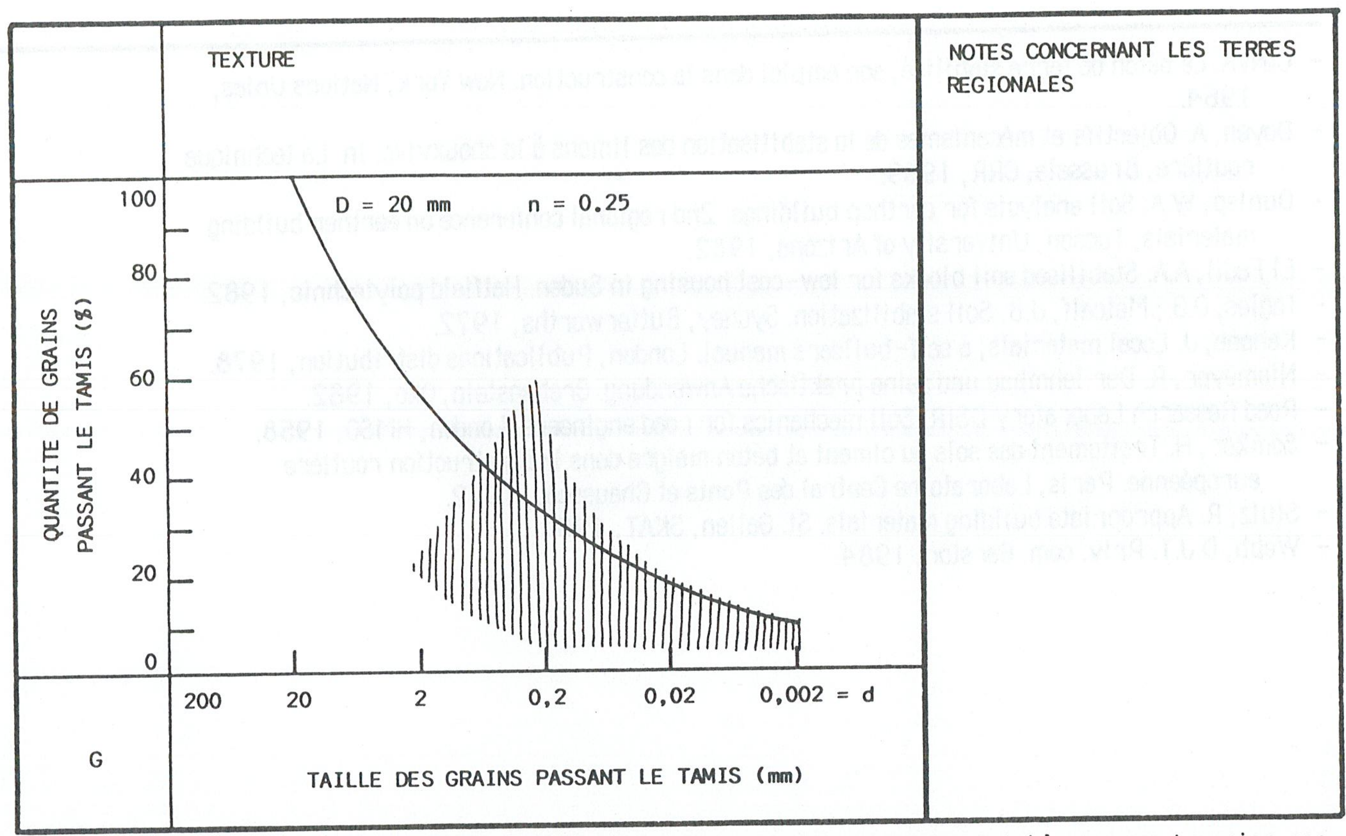
- CHOIX DU BITUME :

Fraction avec des grains de ø < 0,08 mm	Terre humide avec plus de 5% d'eau	Terre sèche avec moins de 5% d'eau
0 à 5 %	SS - 1h (CSS - 1h)	CNS - 2h (SS - 1h*)
5 à 15 %	SS-1, SS-1h (CSS-1,CSS-1h)	CMS - 2h (SS - 1h*, SS - 1*)
15 à 25 %	SS - 1 (CSS - 1)	CMS - 2h

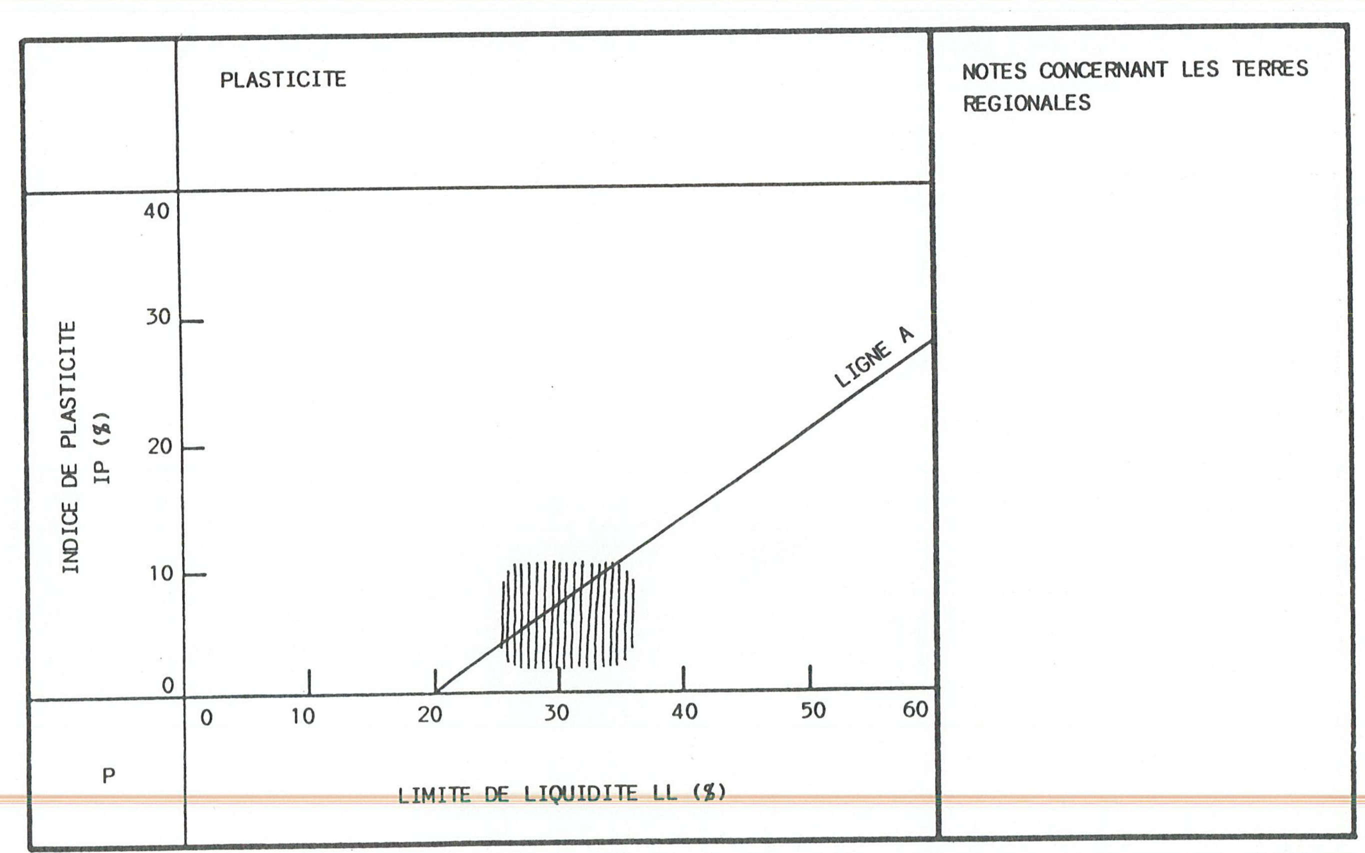
* La terre doit être préhumidifiée.







Les limites des zones recommandées sont approximatives. Les tolérances acceptables peuvent varier considérablement. L'état des connaissances actuelles ne permet pas d'appliquer des limites précises. Il est généralement admis que beaucoup de terres qui ne s'inscrivent pas dans les zones recommandées, donnent quand même des résultats acceptables en pratique. Toutefois les terres qui sont conformes, donnent dans la plupart des cas des résultats satisfaisants. Les zones indiquées sont destinées à guider l'utilisateur et ne sont pas destinées à être appliquées comme des spécifications rigides.



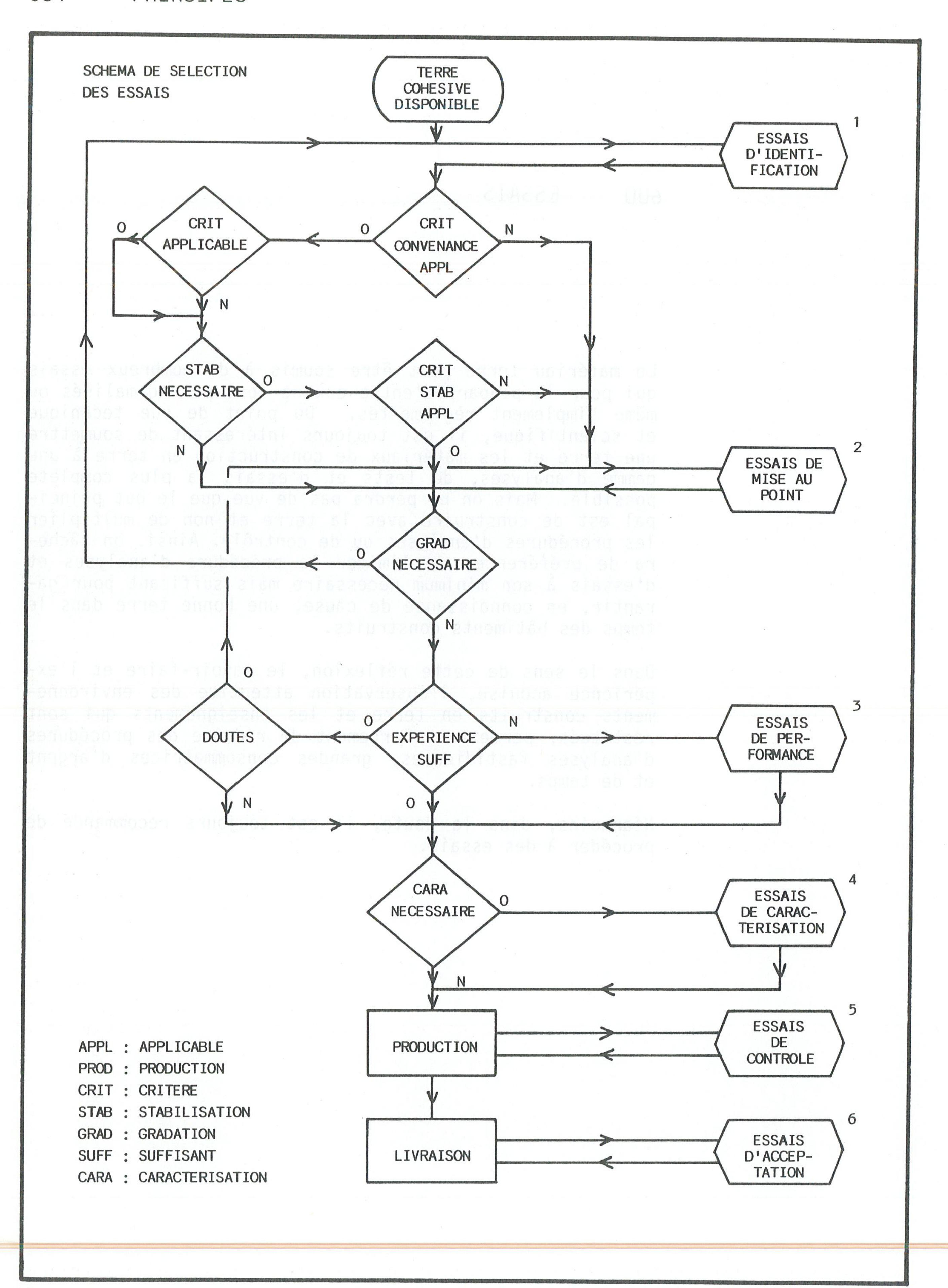
- CINVA. Le béton de terre stabilisé, son emploi dans la construction. New York, Nations Unies, 1964.
- Doyen, A. Objectifs et mécanismes de la stabilisation des limons à la chauxvive. In La technique routière, Brussels, CRR, 1969.
- Dunlap, W.A. Soil analysis for earthen buildings. 2nd regional conference on earthen building materials, Tucson, University of Arizona, 1982.
- El Fadil, A.A. Stabilised soil blocks for low-cost housing in Sudan. Hatfield polytechnic, 1982.
- Ingles, O.G.; Metcalf, J.B. Soil stabilization. Sydney, Butterworths, 1972.
- Kahane, J. Local materials, a self-builders manual. London, Publications distribution, 1978.
- Niemeyer, R. Der lehmbau und seine praktische Anwendung. Grebenstein, Oko, 1982.
- Road Research Laboratory DSIR. Soil mechanics for road engineers. London, HMSO, 1958.
- Somker, H. Traitement des sols au ciment et béton maigre dans la construction routière européenne. Paris, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1972.
- Stulz, R. Appropriate building materials. St. Gallen, SKAT, 1981.
- Webb, D.J.T. Priv. com. Garston, 1984.

600 ESSAIS

Le matériau terre peut être soumis à de nombreux essais qui pour la plupart d'entre eux ne sont pas normalisés ou même simplement règlementés. Du point de vue technique et scientifique, il est toujours intéressant de soumettre une terre et les matériaux de construction en terre à une gamme d'analyses, de tests et d'essais la plus complète possible. Mais on ne perdra pas de vue que le but principal est de construire avec la terre et non de multiplier les procédures d'analyses ou de contrôle. Ainsi, on tâchera de préférence, de limiter la procédure d'analyses et d'essais à son minimum nécessaire mais suffisant pour garantir, en connaissance de cause, une bonne terre dans le temps des bâtiments construits.

Dans le sens de cette réflexion, le savoir-faire et l'expérience acquise, l'observation attentive des environnements construits en terre et les enseignements qui sont restitués, permettent largement de réduire des procédures d'analyses fastidieuses, grandes consommatrices d'argent et de temps.

Néanmoins, dans le doute, il est toujours recommandé de procéder à des essais.


SCHEMA DE SELECTION
DES ESSAIS
TERRE
COHESIVE
DISPONIBLE
ESSAIS
D'IDENTI-
FICATION
1
CRIT
APPLICABLE
CRIT
CONVENANCE
APPL
O
O
N
N
STAB
NECESSAIRE
CRIT
STAB
APPL
O
N
N
O
ESSAIS DE
MISE AU
POINT
2
GRAD
NECESSAIRE
O
N
DOUTES
EXPERIENCE
SUFF
O
O
N
N
O
ESSAIS
DE PER-
FORMANCE
3
CARA
NECESSAIRE
O
N
ESSAIS
DE CARAC-
TERISATION
4
PRODUCTION
ESSAIS
DE
CONTROLE
5
LIVRAISON
ESSAIS
D'ACCEP-
TATION
6
APPL : APPLICABLE
PROD : PRODUCTION
CRIT : CRITERE
STAB : STABILISATION
GRAD : GRADATION
SUFF : SUFFISANT
CARA : CARACTERISATION

Le matériau terre peut être analysé et testé au travers de 6 catégories d'essais mais, le passage dans chacun de ces filtres n'est pas toujours nécessaire. En effet, selon les terres analysées, selon la facilité que l'on aura à les caractériser, selon les conditions de travail,selon l'expérience de l'utilisateur ou du constructeur, il sera possible d'ignorer l'une ou l'autre des catégories d'essais. Toutes les analyses, tous les tests et essais énoncés peuvent être exécutés avec un matériel sophistiqué de laboratoire autant qu'avec un matériel léger et réduit de terrain. On remarquera que beaucoup des essais énoncés sont communs à plusieurs des catégories d'essais. Il n'est pas pour autant nécessaire de répéter ces essais mais leurs résultats devront être differemment interprétés selon qu'ils se situent dans telle ou telle catégorie d'essais. Par exemple, du point de vue de la catégorie "Essais de mise au point", le but de l'essai de gel-dégel sera de prouver que le matériau analysé (une brique compressée stabilisée p.e.) supporte le minimum exigé de 12 cycles de test, selon les conditions posées par certaines des normes le plus couramment appliquées. Par contre, du point de vue de la catégorie "Essais de caractérisation", le matériau s'avère pouvoir supporter p.e. 17 cycles du test gel-dégel, démontrant ainsi une qualité supérieure qui autorise son emploi dans des conditions très dures. On constate aujourd'hui que très peu de pays ont élaboré des normes d'analyses et d'essais spécifiques au matériau terre. On se basera donc le plus souvent sur des normes provenant d'autres disciplines telles que : matériaux de construction en béton, revêtements routiers, etc ... Ces normes ne sont pas nécessairement adaptées au matériau terre. Aussi conviendra-t-il d'adopter ces normes et de les adapter avec beaucoup de souplesse. Les résultats également seront étudiés avec indulgence car il est admis, p.e., que les essais de durabilité sont extrêmement sévères et qu'ils ne correspondent souvent pas du tout aux réalités d'emploi des matériaux, sauf en quelques circonstances exceptionnelles. Quelques exemples concernant l'essai de résistance à la compression peuvent illustrer cette situation. Il en va de même pour un grand nombre des essais présentés.

EXEMPLE

L'essai de résistance à la compression doit être réalisé en un moment opportun qui soit représentatif de la qualité du matériau à cet égard. C'est pourquoi on mesure la résistance à la compression finale d'une brique-échantillon en terre stabilisée au ciment à 28 jours, délai de cure au-delà duquel on suppose que la brique a atteint ou approche sa résistance finale. En fait, ce délai de 28 jours convient pour le béton ou les blocs de ciment qui atteignent à cette période 80 à 90 % de sa résistance finale alors qu'une brique de terre stabilisée au ciment n'atteint, à ce délai, que 60 à 70 % de sa résistance finale. Si la brique testée est stabilisée à la chaux, ce délai de 28 jours n'est pas suffisant. Il est nécessaire dans ce cas, d'allonger le délai de cure du matériau d'au moins 3 semaines sous risque d'établir des comparaisons et des interprétations qui seraient erronées.

D'autre part, il est p.e. tout à fait acceptable de réaliser des essais de résistance à la compression sur des briques de terre du module CINVA (29,5x14x8,8 cm) en les écrasant à plat. Certaines normes autorisent cette procédure. Les avantages de l'écrasement à plat d'une brique sont que l'essai est représentatif de la charge exercée sur la brique dans un mur, que l'on peut écraser des échantillons de la production courante et qu'il n'est pas nécessaire de mettre 2 briques l'une sur l'autre, liées par un mortier comme c'est le cas dans la procédure courante de cet essai. Si l'on prend, à cet égard, la norme belge NBN B/24/201, on constatera que les briques CINVA ont un rapport de hauteur/petit côté (8,8/14) égal à 0,63 donc supérieur en coefficient-limite de 0,55. On pourra donc comparer les résultats obtenus avec ceux obtenus pour d'autres éléments de maçonnerie et même avec ceux obtenus sur des cubes de 20 cm de côté du même matériau. Pour les matériaux comprimés, la mesure de la résistance se fait nécessairement dans le sens de la compression de la terre. En effet, si l'on mesure dans le sens perpendiculaire à cette direction, les valeurs de résistance obtenues peuvent être abaissées de 25 à 45 %, faussant entièrement la réalité.

ANALYSES D'IDENTIFICATION

Le but de ces analyses est de déterminer les caractéristiques des matériaux de base en vue de mieux situer le comportement du produit final. Une fois ces caractéristiques connues, il sera possible d'envisager les possibilités d'emploi de ces matériaux de base à partir de tableaux, d'abaques, de règles qui orienteront la prise de décisions. Les analyses d'identification sont les suivantes :

. Identification visuelle.
. Essais sensoriels.
. Teneur en eau naturelle.
. Granulométrie.
. Sédimentométrie.
. Equivalent de sable.
. Limite de liquidité.
. Limite de plasticité.
. Limite d'absorption.
. Limite de retrait.
. Retrait volumique.
. Retrait linéaire.
. Essais Proctor.
. Masse volumique.
. Masse volumique apparente.
. Essai à la traction humide.
. Essai au cisaillement humide.
. Teneur en eau après séchage.
. Couleur état sec et état humide.
. Dissolution dans l'eau.
. Identification minéralogique.
. Surface spécifique.
. Essai d'Emerson.
. Essais de Pfefferkorn.
. Quantité de matières organiques et humiques.
. Nature des matières organiques et humiques.
. Teneur en Oxydes de Fer.
. Teneur en Oxydes de Magnésium.
. Teneur en Oxydes de Calcium.
. Teneur en Carbonates.
. Teneur en Sulfates.
. Teneur en sels solubles.
. Teneurs en sels insolubles.
. Perte au feu.
. pH.
. Etc ... (liste non-limitative).

ESSAIS DE MISE AU POINT

Le but de ces essais est de mettre au point un matériau de construction valable, à partir des matériaux de base identifiés. Ces essais précisent les paramètres nécessaires à respecter lors de la composition et la manufacture des produits. Les paramètres serviront également de référence pour les analyses et essais de contrôle et d'acceptation des produits. Les essais de mise au point sont les suivants :

. Granulométrie.
. Sédimentométrie.
. Equivalent de sable.
. Limite de liquidité.
. Limite de plasticité.
. Retrait volumique.
. Retrait linéaire.
. Essais Proctor.
. Masse volumique.
. Masse volumique apparente.
. Poids minimal humide.
. Poids minimal sec.
. Indice des vides.
. Teneur en eau après séchage.
. Degré de pulvérisation.
. Pénétrométrie.
. Résistance à la compression sèche et humide.
. Résistance à la traction.
. Résistance à la flexion.
. Résistance au cisaillement.
. Coefficient de Poisson.
. Module d'élasticité (Young).
. Gonflement.
. Retrait de séchage.
. Dilatation thermique et chocs thermiques.
. Perméabilité.
. Absorption d'eau.
. Gélivité.
. Efflorescences.
. Erosion.
. Abrasion.
. Résistance au feu.
. Compatibilité des mortiers.
. Compatibilité des enduits.
. Etc ... (liste non-limitative).

TEST D'HUMIDIFICATION-SECHAGE

La procédure présentée est celle de la norme ASTM D 559 et de la norme AASHO T 135.

Après une période de stockage de 7 jours en atmosphère très humide, les éprouvettes sont immergées complètement dans l'eau, à la température de la pièce de travail, durant 5 heures. Passé ce délai, les éprouvettes sont retirées de l'eau puis séchées dans un four ou dans une étuve à la température de 71°C. Ce séchage dure 42 heures, délai au-delà duquel les éprouvettes sont retirées du four puis brossées une à une. Ce brossage est effectué à l'aide d'une brosse métallique et sert à évacuer tous les fragments de matériau affectés par les cycles de mouillage et de séchage. Le brossage est ferme et concerne chaque endroit des éprouvettes, dans deux directions (haut en bas p.e.), soit un total de 18 à 25 coups de brosse. La force appliquée au brossage est de l'ordre de 1,5 kg. La procédure sus-décrite constitue un cycle de 48 heures de mouillage-séchage. Les éprouvettes sont ensuite de nouveau immergées dans l'eau et soumises à un autre cycle de mouillage-séchage. La procédure est répétée pour 12 cycles. Si le test doit être interrompu (week-end p.e.), les éprouvettes sont stockées dans le four ou dans l'étuve. Après les 12 cycles de tests, les éprouvettes sont séchées à 110°C jusqu'à obtention de leur poids sec constant. On calcule ensuite la perte de poids par rapport au poids initial. Lorsque les éprouvettes sont stabilisées à la chaux, les tests de mouillage-séchage sont effectués après un délai de 1 mois. Ce test est considéré comme extrêmement sévère.

EROSION

Ce test simule une pluie artificielle normalisée que subit la face exposée à la pluie du bloc échantillon. L'arrosage est réalisé à l'aide d'une pompe maintenant une pression constante de 1,4 daN/cm² positionnée en amont d'une pomme d'arrosoir ou de douche de 10 cm de diamètre placée à 20 cm du bloc testé. Le jet, dont la pression est contrôlée au manomètre, est maintenu durant 2 heures perpendiculairement à la surface du bloc. On mesure ensuite les profondeurs des trous d'érosion et l'on considère la moyenne des 18 plus grands trous mesurés sur chaque bloc. Cette moyenne est notée : Pmm. Les résultats de ce test demeurent indicatifs. Une légère érosion ou un grêlage apparaissant sur un bloc de terre stabilisée ne doivent pas être interprétés défavorablement.

GEL-DEGEL

La procédure présentée est celle de la norme ASTM D 560 et de la norme AASHO T 136.

Après une période de stockage de 7 jours en ambiance très humide, les éprouvettes sont placées sur un matériau absorbant saturé d'eau, puis déposées dans un réfrigérateur, exposées à une t° constante de - 23°C max., durant 24 heures, puis retirées. Les éprouvettes sont décongelées dans une ambiance humide (100 % de H.R.) à la t° de 21°C, durant 23 heures, puis retirées. Les éprouvettes doivent absorber de l'eau par capillarité (à partir du matériau absorbant) durant cette phase de décongélation. Les éprouvettes sont ensuites brossées suivant la procédure du test de mouillage-séchage. Le test est réalisé pour 12 cycles de gel-dégel, chaque éprouvette étant retournée sur le matelas absorbant entre chaque cycle. Certaines éprouvettes faites en terre silteuse ou argileuse peuvent s'écailler, notamment après le sixième cycle du test. On veillera à éliminer cette écaillure afin de ne pas contrarier le brossage. Si le test doit être interrompu (week-end p.e.), les éprouvettes sont stockées dans le réfrigérateur. Après les 12 cycles de test, les éprouvettes sont séchées dans un four à une température de 110°C jusqu'à obtention de leur poids constant. On calcule ensuite la perte de poids par rapport au poids initial. Ce test est considéré comme extrêmement sévère.

ABRASION

Les blocs testés sont secs. Une brosse métallique lestée d'un poids de 6 kg est utilisée pour frotter la face exposée à la pluie du bloc (en fonction de l'appareil de maçonnerie prévu). Un aller et retour de la brosse constitue un cycle d'abrasion; le brossage est répété pour 50 cycles. La mesure consiste en un pesage du matériau détaché par le brossage. Le poids sec de ce matériau est rapporté au cm² de surface brossée afin d'obtenir un test indépendant de la forme et de la taille du bloc. Les blocs stabilisés au ciment et au bitume sont testés à 28 jours, ceux stabilisés à la chaux, à 3 mois.

ESSAIS DE PERFORMANCE

Le but de ces essais est de vérifier les performances du matériau déterminées en laboratoire, en les testant sous des conditions d'emploi simulées du matériau ou de systèmes constructifs. Il s'agit par exemple de tester le comportement de murs ou d'autres éléments de structure tels qu'ils apparaissent dans une construction. Les essais de performance les plus pratiqués sont les suivants :

. Résistance à la compression sèche et humide. Cet essai est réalisé en charge centrée et en charge exentrée lorsque l'on teste un mur p.e.
. Résistance à la traction sèche et humide.
. Résistance à la flexion sèche et humide.
. Résistance à la pression transversale.
. Résistance à la pression latérale.
. Résistance aux chocs (corps mou).
. Résistance aux sollicitations sismiques.
. Charge sur voûtes, dômes et arcs.
. Charges sur poutres et linteaux.
. Flambage.
. Fluage.
. Coefficient de Poisson.
. Module d'élasticité (Young).
. Gonflement et retrait à l'eau.
. Passage d'eau.
. Remontées capillaires.
. Erosion à l'eau.
. Erosion éolienne.
. Gel-dégel.
. Dilatation thermique.
. Adhérence du mortier aux blocs.
. Adhérence des enduits aux murs.
. Etc ... (liste non-limitative).

ESSAIS DE CARACTERISATION

Le but de ces essais est de caractériser certaines propriétés physiques du matériau produit qui sera utilisé en construction. Quelques-unes de ces caractéristiques permettront d'effectuer des calculs de comportement du bâtiment, en matière de thermique p.e., ou d'apprécier le comportement de systèmes constructifs dans le temps, enduits p.e. ou encore de caractériser le confort et les conditions de sécurité générales. Les principaux essais de caractérisation sont les suivants :

. Compatibilité des enduits.
. Compatibilité des mortiers.
. Résistance au feu.
. Coefficient de conduction.
. Chaleur spécifique.
. Coefficient d'amortissement thermique.
. Coefficient de stockage thermique.
. Effusivité et diffusivité thermique.
. Dilatation thermique.
. Susceptibilité à la gélivité.
. Absorption d'eau.
. Perméabilité.
. Capillarité.
. Retrait de séchage.
. Retrait volumique.
. Retrait linéaire.
. Teneur en eau après séchage.
. Masse volumique.
. Couleur.
. Texture de surface.
. Radiations et protection nucléaire.
. Etc ... (liste non-limitative).

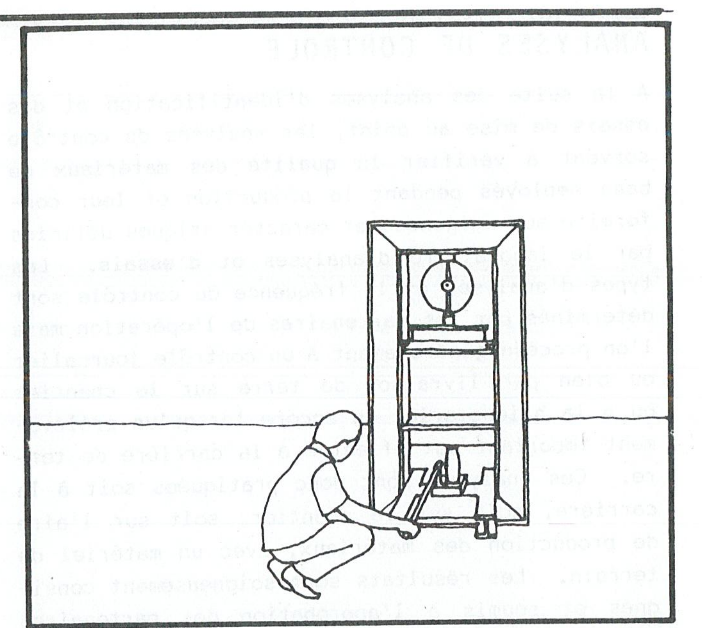
RESISTANCE A LA COMPRESSION

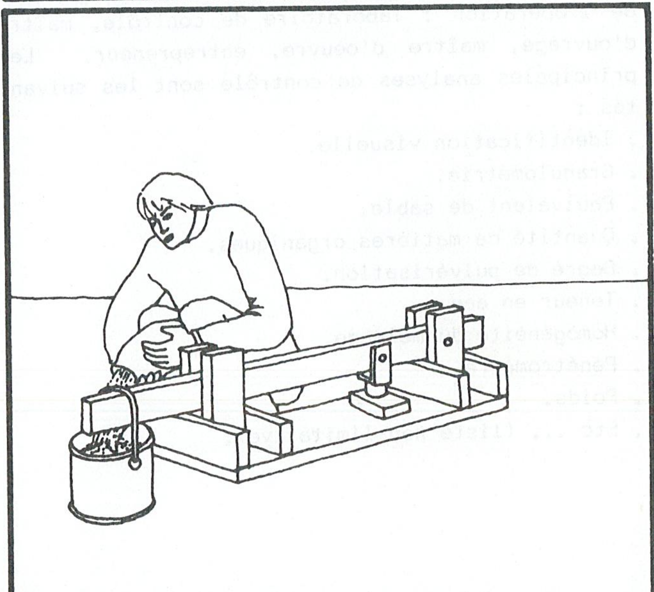
Pour réaliser cet essai de résistance à la compression sèche sur des matériaux-échantillons, les presses classiques des laboratoires d'essais sont tout à fait convenables. Si l'on veut p.e. écraser des briques de terre comprimée stabilisées du type Cinva qui sont performantes, il conviendra de prévoir une presse pouvant charger la brique jusqu'à un minimum de 100 daN/cm², soit une presse qui pourra atteindre les 400 KN. Sur les chantiers il sera possible de confectionner des petites presses à l'aide de quelques poutrelles en fer ou même avec un cric de camion. Ce matériel de chantier sera si possible équipé d'un manomètre afin de permettre une lecture directe de la force appliquée sur l'échantillon. Si le manomètre fait défaut, on pourra utiliser un comparateur dynamométrique mais, ce matériel reste fragile et il faudra travailler sur des petits échantillons. On pourra également réaliser des petites presses à levier, métalliques ou en bois. La force applicable à l'aide de ces presses à levier n'est pas très importante. Il importe donc de travailler avec des échantillons spéciaux (cylindres ou cubes de 5 cm de côté). La préparation d'éprouvettes de pisé, de bauge ou d'adobes ne pose pas de problèmes mais, pour des blocs comprimés, il importe de procéder par sciage afin de réduire la taille de l'éprouvette : des dommages structurels sont à prévoir. On peut encore fabriquer des éprouvettes spéciales mais elles risquent de ne pas être représentatives des briques comprimées testées.

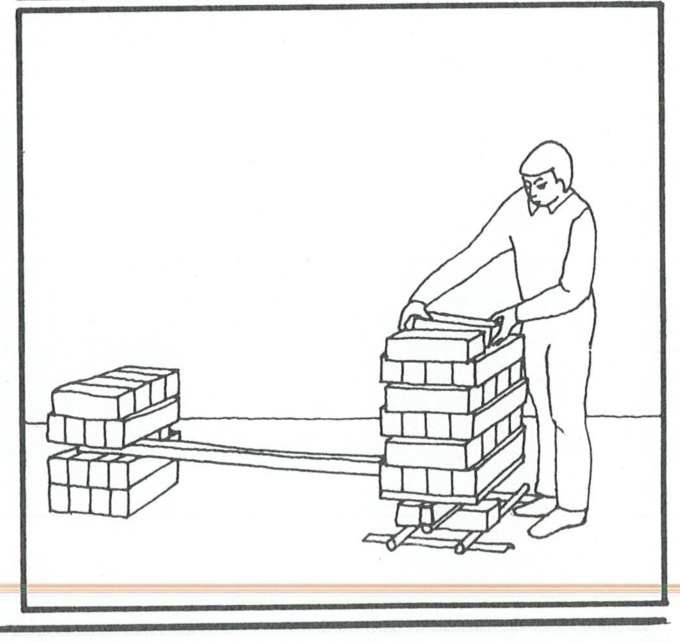
RESISTANCE A LA TRACTION

Elle peut être mesurée grâce à un procédé de chantier mis au point par le I.I.H.T. de Californie (U.S.A.). Une brique de terre échantillon est posée (sur une de ces grandes faces) sur 2 tubes de ϕ = 2,5 cm espacés de 20 cm et perpendiculaires à la grande longueur de la brique. Dans l'axe du dessus de la brique, parallèle au petit côté de la brique, on pose un autre tube, identique aux précédents, qui est surmonté d'un plateau en équilibre. On charge soigneusement ce plateau au rythme de 250 kg/minute avec d'autres briques, jusqu'à la rupture de la brique testée. Le but n'est pas de connaître la résistance exacte mais le dépassement d'un seuil-limite que l'on détermine par avance. La résistance à la traction, donnée en daN/cm² est égale à :

$$\tau = \frac{1{,}5 \times 20 \text{ cm} \times (\text{charge en kg})}{(\text{largeur bloc en cm}) \times (\text{hauteur bloc en cm})^2}$$







ANALYSES DE CONTROLE

A la suite des analyses d'identification et des essais de mise au point, les analyses de contrôle servent à vérifier la qualité des matériaux de base employés pendant la production et leur conformité aux exigences et caractéristiques définies par le laboratoire d'analyses et d'essais. Les types d'analyses et la fréquence du contrôle sont déterminés par les partenaires de l'opération mais l'on procède généralement à un contrôle journalier ou bien par livraison de terre sur le chantier ou à la briqueterie, ou encore lorsqu'un prélèvement important est effectué à la carrière de terre. Ces analyses sont donc pratiquées soit à la carrière, soit sur le chantier, soit sur l'aire de production des matériaux, avec un matériel de terrain. Les résultats sont soigneusement consignés et soumis à l'approbation des partenaires de l'opération : laboratoire de contrôle, maître d'ouvrage, maître d'oeuvre, entrepreneur. Les principales analyses de contrôle sont les suivantes :

. Identification visuelle.
. Granulométrie.
. Equivalent de sable.
. Quantité de matières organiques.
. Degré de pulvérisation.
. Teneur en eau.
. Homogénéité du mélange.
. Pénétromètre.
. Poids.
. Etc ... (liste non-limitative).

ESSAI D'ACCEPTATION

Ces essais sont réalisés pendant la phase de production des matériaux de construction ou à la réception des matériaux, soit chez le producteur ou à la briqueterie, soit sur le chantier. Leur but est de vérifier la qualité de la production et sa conformité aux exigences et caractéristiques déterminées par le laboratoire d'analyse et d'essais. Pour les blocs ou briques, on prélève généralement sur la production 5 échantillons sur 1000 en début de production, puis 1 échantillon sur 1000, en pleine phase de production contrôlée. Pour les petites briqueteries produisant moins de 1 000 briques/jour, on prélève 2 échantillons par jour. Pour les techniques de mise en oeuvre telles que le pisé ou la bauge, on effectue 2 essais journaliers en début de chantier puis 1 par la suite.
Ces essais sont réalisés sur le chantier à l'aide d'un équipement de terrain. Les résultats sont soigneusement consignés et soumis à l'approbation des partenaires de l'opération : laboratoire de contrôle, maître d'ouvrage, maître d'oeuvre, entrepreneur. En cas de situation litigieuse ou de doute quant à la qualité effective des matériaux, des échantillons sont envoyés au laboratoire qui dressera un procès verbal d'analyses. Les principaux essais d'acceptation sont les suivants:

. Couleur à l'état sec et humide.
. Efflorescences.
. Homogénéité de la matière.
. Compacité.
. Teneur en stabilisant.
. Poids sec.
. Masse volumique apparente.
. Dimensions.
. Aspect des surfaces.
. Retrait de séchage.
. Résistance à la compression.
. Résistance à la traction.
. Etc ... (liste non-limitative)

PENETROMETRE DE POCHE

Ce petit appareil très pratique permet de contrôler la densité des briques en pleine production. On effectue au moins 5 pénétrations sur chaque brique. La surface de pénétration est de 3 à 5 mm et la profondeur de l'ordre de 5 mm. La pénétrométrie donne une indication générale et les résultats sont jaugés par rapport à un seuil d'acceptabilité des matériaux définis au préalable.

SCLEROMETRE PENDULAIRE

C'est un appareil astucieux qui permet de contrôler la qualité des matériaux, généralement sur un ouvrage achevé (murs p.e.), sans détériorer le matériau. Le scléromètre pendulaire donne la résistance en compression du matériau, en daN/cm². Pour la construction en terre, il faut employer les modèles de scléromètres convenant aux matériaux à faible résistance : de 50 à 80 daN/cm².

TENEUR EN EAU OPTIMALE

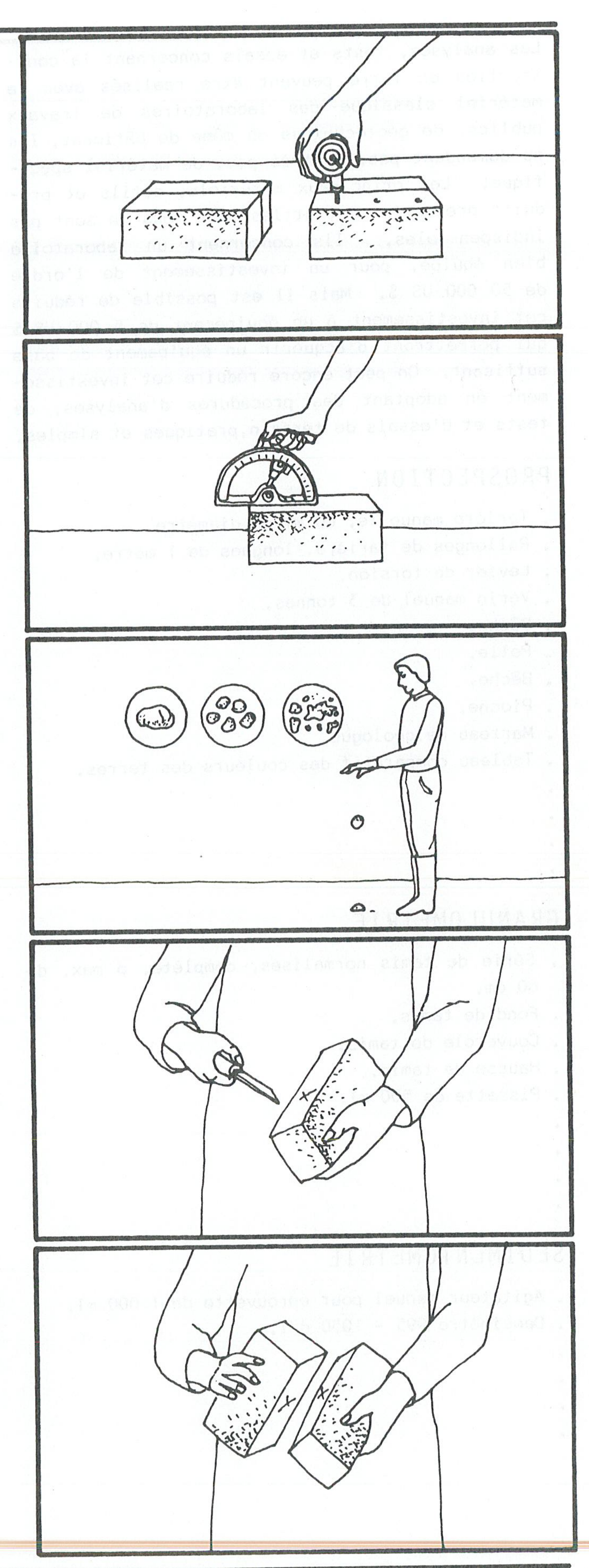
Pour estimer la T.E.O. d'une gâchée de terre destinée à être comprimée, on peut prélever une poignée de cette terre,la comprimer en fermant fortement la main et la laisser tomber sur une surface dure et plane, d'une hauteur d'environ 1,10 m. La teneur en eau est correcte si la boule de terre se désagrège en 4 ou 5 morceaux. Si la boule s'applatit sans se désagréger, la teneur en eau est trop forte. Si la boule se pulvérise, la terre est trop sèche.

PENETRATION

D'une distance d'environ 5 à 10 cm, on fait pénétrer un stylet dans la brique-échantillon ou dans une éprouvette prélevée. La résistance du matériau est jaugée en fonction de la force de pénétration du stylet et de la dureté effective du matériau. Un seuil limite d'acceptabilité fait référence. Cet essai est assez subjectif.

IMPACT

Deux briques-échantillons stabilisées au ciment ou 2 éprouvettes prélevées, tenues perpendiculairement l'une par rapport à l'autre, sont choquées plusieurs fois avec une force d'impact croissante entre chaque choc. La dureté du matériaux est jaugée en fonction de la sonorité restituée par les chocs.



605 EQUIPEMENT DE LABORATOIRE

Les analyses, tests et essais concernant la construction en terre peuvent être réalisés avec le matériel classique des laboratoires de travaux publics, de géotechnique ou même de bâtiment. Ils ne demandent pas, ou très peu, de matériel spécifique. Les principaux matériels, outils et produits présentés sont utiles mais tous ne sont pas indispensables. Ils concernent un laboratoire bien équipé, pour un investissement de l'ordre de 50 000 US $. Mais il est possible de réduire cet investissement à un équipement de 5 000 US $ qui permettront d'acquérir un équipement de base suffisant. On peut encore réduire cet investissement en adoptant des procédures d'analyses, de tests et d'essais de terrain, pratiques et simples.

PROSPECTION

- Tarière manuelle, 80 mm de diamètre.
- Rallonges de tarière, longues de 1 mètre.
- Levier de torsion.
- Vérin manuel de 3 tonnes.
- Bâche.
- Pelle.
- Bêche.
- Pioche.
- Marteau de géologue.
- Tableau comparatif des couleurs des terres.

GRANULOMETRIE

- Série de tamis normalisés, complète, ø max. de 60 cm.
- Fond de tamis.
- Couvercle de tamis.
- Hausse de tamis.
- Pissette de 500 ml.

SEDIMENTOMETRIE

- Agitateur manuel pour éprouvette de 1 000 ml.
- Densimètre 995 - 1050 g/l.

PROCTOR

- Moule Proctor complet avec hausse.
- Règle à araser.
- Dame de compactage.

ATTERBERG

- Appareil de Casagrande complet.
- Coupelle lisse.
- Coupelle granuleuse.
- Spatule droite flexible de 150 mm.
- Outil à rainurer de Casagrande.
- Outil à rainurer A.S.T.M.
- Marbre 45x30x3 cm.
- Truelle langue de chat longue de 12 cm.
- Calibre de plasticité de 3 mm de diamètre.

COHESION

- Moule.
- Anneaux de traction.
- Potence.
- Balast.

RESISTANCE

- Presse de 400 KN.
- Plateau d'essais de fendage.
- Machine à traction.
- Malaxeur planétaire de 50 l.
- Moules cubiques.
- Moules cylindriques.
- Pénétromètre à aiguille de poche.
- Scléromètre 5-80 daN/cm².

RETRAIT

- Moule de retrait d'Alcock.
- Coupelle de retrait de ø 50 mm, 415 mm.

DURABILITE

- Réfrigérateur - 30°C.
- Brosse métallique.
- Pomme d'arrosoir de ø = 10 cm.
- Manomètre.
- Pompe.
- Tuyau d'arrosage.
-
-
-
-

PRODUITS CHIMIQUES

- Acide chloridrique.
- Acide nitrique.
- Acide oxalique.
- Chlorure de baryum.
- Chromate de potassium.
- Chaux.
- Eau distillée.
- Hexamétaphosphate de sodium.
- Indicateur pH universel papier.
- Indicateur pH universel éthanol.
- Lait de chaux.
- Nitrate d'argent.
- Phénolphtaléine.
- Hydroxyde de potassium.
- Rouge de méthyle.
- Hydroxyde de sodium.
-
-
-
-

APPAREILS DIVERS

- pH mètre portatif.
- Hygromètre.
- Thermomètre de contact.
- Thermomètre d'ambiance - 10/+ 80°C.
- Thermomètre de pénétration.
- Microscope.
- Loupe de mesure.
- Balance de 20 kg.
- Balance suspendue de chantier de 10 kg.
- Balance 1 g/7 kg.
- Balance 0,1 g/500 g.
- Balance 0,001 g/100 mg.
- Chronomètre 1/5 sec.
- Minuterie.
- Réveil.
- Comparateur à cadran 1/100
- Pied à coulisse.
- Etuve 120°C.
-
-

MATERIEL DIVERS

- Bocaux en verre de 2 l., ø 12 à 15 cm.
- Couvercles pour bocaux.
- Poêles.
- Baril polyéthylène de 20 l.
- Burette.
- Tube de caoutchouc de 70 cm, ø 0,5 cm.
- Récipients en pyrex de 400 ml et 2 000 ml.
- Eprouvettes 1 000 ml.
- Eprouvettes 500 ml.
- Eprouvettes 100 ml.
- Bouchons en caoutchouc pour éprouvettes.
- Entonnoir, ø 140 mm.
- Sacs polyéthylène 10 l.
- Sacs de jute 10 l.
- Bacs de 12 l.
- Réchaud.
- Mortier 2 l.
- Pilon dur.
- Pilon caoutchouc
- Etiquettes.
-
-
-
-

OUTILLAGE DIVERS

- Gants d'amiante.
- Petite pelle.
- Spatule droite flexible 150 mm.
- Truelle carrée 16 cm.
- Spatule droite rigide.
- Louche inox, petit et grand modèle.
- Cuiller de laboratoire inox.
- Marteau 42x36 - 960 g.
- Burin 300 mm.
- Couteau.
- Latte.
- Double mètre.
- Pinceaux.
- Autre petit outillage de bricolage.
-
-
-
-

- AGRA. Recommandations pour la conception des bâtiments du village terre. Grenoble, AGRA, 1982.
- Bertram, G.E.; La Baugh WM.C. Soil tests. Washington, American Road Builders' Association, 1964.
- CRET. Maisons en terre. Paris, CRET, 1956.
- Doat, P. et al. Construire en terre. Paris, éditions Alternatives et Parallèles, 1979.
- Grésillon, J.M. Etude de l'aptitude des sols à la stabilisation au ciment. Application à la construction. In annales de l'ITBTP, Paris, ITBTP, 1978.
- Hernández Ruiz, L.E.; Márquez Luna, J.A. Cartilla de pruebas de campo para selección de tierras en la fabricación de adobes. México, CONESCAL, 1983.
- International Institute of Housing Technology. The manufacture of asphalt emulsion stabilized soil bricks and brick maker's manual. Fresno, IIHT, 1972.
- PCA. Soil-cement laboratory handbook. Stokie, PCA, 1971.
- Sulzer, H.D. Priv. com. Zürich, 1984.
- Velarde Gonzalez, J.M. La tierra estabilizada y su utilización en la producción de componentes para la construcción. Panamá, Universidad de Panamá, 1980.

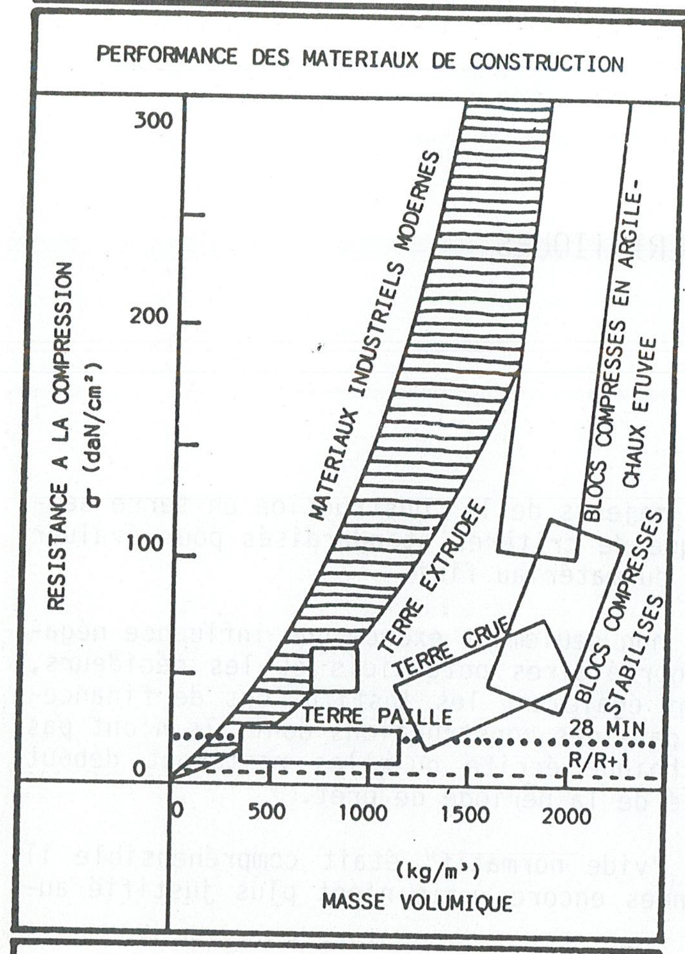
700 CARACTERISTIQUES

Un des problèmes majeurs de la construction en terre semble être le manque de critères standardisés pour évaluer les performances du matériau fini.

Cette situation, non seulement exerce une influence négative sur les propriétaires potentiels et les décideurs, mais elle retient également les institutions de financement d'investir dans des constructions dont ils n'ont pas la garantie technique écrite qu'elles resteront debout plus de la moitié de la période de prêt.

Ce sentiment de "vide normatif" était compréhensible il y a quelques années encore, mais n'est plus justifié aujourd'hui.

Des expériences et recherches innombrables ont eu lieu, qui ont permis de caractériser le matériau suffisamment bien; et bon nombre de pays ont élaborés des normes valables.



RESISTANCE A LA COMPRESSION

1 RESISTANCE DEMANDEE PAR DESCENTE DES CHARGES. - maisons à 1 niveau	1 daN/cm²
2 COEFFICIENT DE SECURITE - dispersion dans qualité de production - dispersion dans qualité d'exécution - accroissement accidentel des surcharges	x 3
3 COEFFICIENT DE REDUCTION - nature matériau - résistance du mortier - élancement du mur - mode de chargement	x 4
4 COEFFICIENT DE SATURATION - rapport résistance humide résistance à sec	x 2
TOTAL	x 24

σ 28 = 24 daN/cm³

Lorsque la qualité du matériau terre est évoquée, la question aussitôt posée concerne sa résistance à la compression. On admet en général que la terre est un matériau lourd peu résistant à la compression. Beaucoup de matériaux en terre se situent dans la même plage de résistance et se comportent à l'égal d'un béton de faible résistance. La terre peut être en effet considérée comme un béton maigre. En poussant la comparaison avec d'autres matériaux, on peut dire que :

- Les produits en terre les plus médiocres sont peu résistants pour un poids spécifique très supérieur à celui des matériaux minéraux classiques.
- Sur toute une plage de résistance, les matériaux en terre sont comparables aux matériaux minéraux classiques.

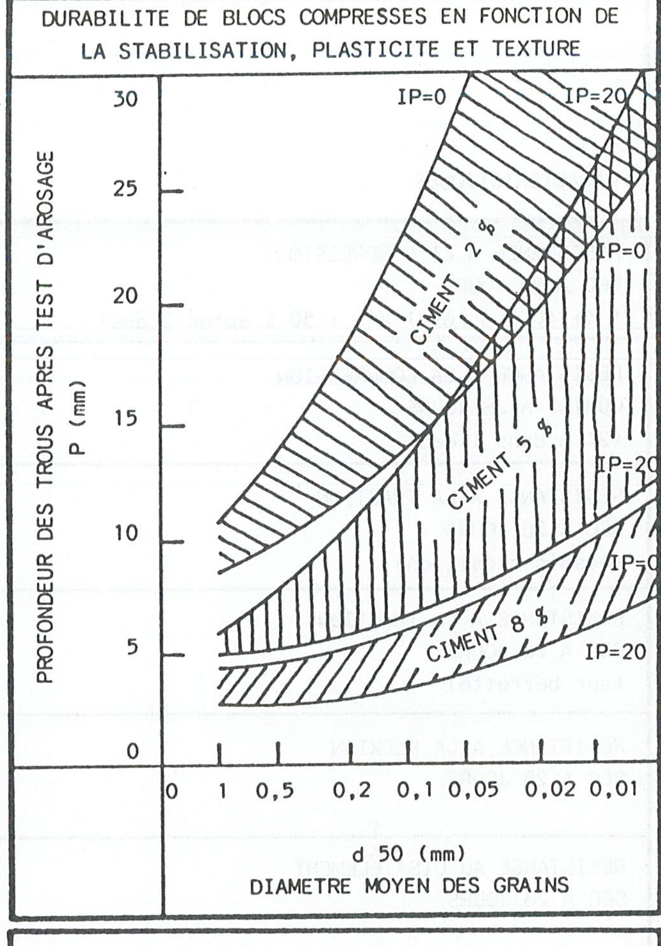
La terre est capable de très hautes performances. Des études de l'I.C.A.M. de Lille (France) (1) montrent que des produits de terre stabilisée à la chaux traités à l'autoclave (250° C à 16 atm) résistent à 900 daN/cm² à la compression. Avec un traitement à l'étuve sèche (350° C) la résistance bondit jusqu'à 2 000 daN/cm². En effet, divers procédés (compression, stabilisation, étuvage, etc...) permettent d'obtenir de très hautes résistances. Mais, a-t-on besoin de telles performances ? Pour des bâtiments de plain-pied ou en R + 1, la descente des charges est d'environ 1 à 2 daN/cm². Il n'est donc pas utile d'employer des matériaux résistants à 100 daN/cm² ou plus. Néanmoins, 1 daN/cm² ne suffit pas car d'autres problèmes s'ajoutent au seul rapport de performance d'une brique et d'une construction. Aussi admet-on un coefficient de sécurité de 20 à 30. 20 à 25 daN/cm² donnent une grande marge de sécurité aujourd'hui requise par la plupart des normes et lorsque la fabrication des briques est bien contrôlée, 10 à 15 daN/cm² sont un minimum absolu garantissant une bonne résistance, notamment à la manipulation.

La deuxième qualité exigée du matériau terre est sa résistance à l'eau. Les essais classiques appliqués à d'autres matériaux (mouillage - séchage, aspersion, immersion totale ou partielle, gel-dégel, etc...) sont adoptés pour le matériau terre sans avoir été adaptés. Les résultats obtenus en laboratoire ne concordent pas toujours avec ceux obtenus dans des conditions d'exploitation réelles. Ces résultats concernent des échantillons isolés et non des murs ou des constructions en grandeur réelle.

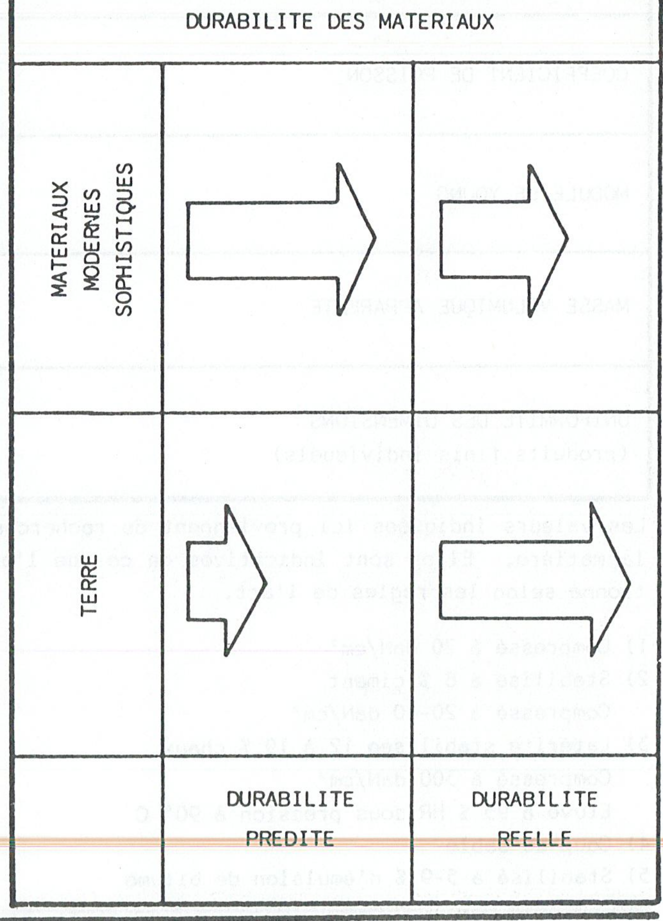
En 1974, en Haute-Volta, l'E.I.E.R. a établi des comparaisons entre des essais théoriques et la réalité. Les résultats (2) précisent que le test d'érosion de murs de terre stabilisée non enduits s'est révélé "très sévère comparé au comportement

de murs-témoins exposés aux intempéries depuis trois années". L'érosion d'un mur exposé est négligeable par rapport à celle observée sur le test. C'est la durabilité du matériau terre qui demeure sa principale qualité. Celle-ci se jauge en terme de résistance à l'environnement bioclimatique (pluies, gel, vent) et aux conditions d'utilisation (actions des habitants, des animaux, etc ...). Cette complexité n'est pas prise en compte par les essais théoriques. Une simple brique d'adobe séchée au soleil ne résiste pas aux tests de laboratoire; sa résistance moyenne à la compression de 5 à 10 daN/cm² ou sa désagrégation totale après immersion dans l'eau suscitent un verdict sévère : matériau inutilisable. C'est pourtant avec de telles briques que l'on a construit au Yémen des édifices de plusieurs étages ou des réservoirs d'eau en Iran. Par ailleurs, la durabilité théorique de nombreux matériaux modernes est très supérieure à celle observée en réalité. On ne peut exprimer la durabilité d'un matériau qu'en se basant sur des chiffres; il faut aussi considérer la performance des constructions. A cet égard, les exemples de bâtiments âgés de plusieurs siècles sont nombreux en tous pays et prouvent la durabilité du matériau terre. Mais le contexte actuel oblige à quantifier les caractéristiques de la terre. Si la valeur des chiffres est moindre pour des petites constructions individuelles, elle demeure la référence pour les organismes de décision, de financement et d'assurance, pour les architectes et les entrepreneurs. Il convient de se garder d'interprétations trop hâtives à partir de ces seuls résultats théoriques et scientifiques qui négligent la réalité.

DURABILITE DE BLOCS COMPRESSES EN FONCTION DE LA STABILISATION, PLASTICITE ET TEXTURE



DURABILITE DES MATERIAUX



702 CARACTERISTIQUES MECANIQUES

CARACTERISTIQUES	S	U	CLASSES A	B	C	D
RESISTANCE A LA COMPRESSION SEC A 28 JOURS * (+ 40 % après 1 an, + 50 % après 2 ans)	σ 28	daN/cm²	>120	50 120	20 50	ENVIR. 20
RESISTANCE A LA COMPRESSION HUMIDE A 28 JOURS (24 h dans l'eau)	σ h28	daN/cm²	> 20	10 20	5 10	0 5
RESISTANCE A LA TRACTION SEC A 28 JOURS (essais brésilien)	τ 28	daN/cm²	> 20	10 20	5 10	0 5
RESISTANCE A LA TRACTION SEC A 28 JOURS (sur barrette)	τ 28	daN/cm²	> 20	10 20	5 10	0 5
RESISTANCE A LA FLEXION SEC A 28 JOURS	τ 28	daN/cm²	> 20	10 20	5 10	ENVIR. 5
RESISTANCE AU CISAILLEMENT SEC A 28 JOURS	τ 28	daN/cm²	>20	10 20	5 10	ENVIR. 5
COEFFICIENT DE POISSON	μ		0 0,15	0,15 0,35	0,35 0,50	>0,5
MODULE DE YOUNG	E	daN/cm²		7.000 70.000		
MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	P	Kg/m³	>2.200	1.700 2.200	1.200 1.700	<1.200
UNIFORMITE DES DIMENSIONS (produits finis individuels)			EXCEL.	BON	MOYEN	FAIBLE

Les valeurs indiquées ici proviennent de recherches menées dans des laboratoires qui font autorité en la matière. Elles sont indicatives de ce que l'on peut raisonnablement attendre d'un produit confectionné selon les règles de l'art.

1) Compressé à 20 daN/cm²
2) Stabilisé à 8 % ciment
Compressé à 20-40 daN/cm²
3) Latérite stabilisée 12 à 19 % chaux
Compressé à 300 daN/cm²
Etuvé à 95 % HR sous pression à 90° C
4) Coup de sable
5) Stabilisé à 5-9 % d'émulsion de bitume
6) Compressé à 90-95 % Proctor Standard
7) Idem. Stabilisé à 8 % ciment
8) Produits creux de 1 100 kg/m³
Stabilisé au ciment 15 % min.
9) Double face sur claye de branches
10) 600 à 800 kg/m³
11) Indiquer valeurs dans votre région
12) Indiquer valeurs dans votre région

I BLOCS COMPRESSES			II ADOBE		III PISE		IV BRIQUES ETIREES	V TORCHIS	VI TERRE PAILLE	VII BRIQUES CUITES	VIII BLOCS CIMENT
1 CRU	2 STA	3 STA	4 CRU	5 STA	6 CRU	7 STA	8 STA	9 CRU	10 CRU	11	12
D *	C *	A *	D	C	D *	C *	B				
D	A	A	D		D	A	A				
	B					B					
C					C						
C					C						
D					D						
	B					B					
	B			B		B					
B	B	A	C	C	B	B	D				
B	B	A	C	C	D	D	A				

703 CARACTERISTIQUES STATIQUES

CARACTERISTIQUES	S	U	CLASSES A	B	C	D
RESISTANCE A L'IMPACT TANGENTIEL D'UN CORPS MOU (hauteur de départ d'un sac de sable de 27 kg suspendu à la verticale du mur)		m	> 3	2 3	1 2	< 1
RESISTANCE A L'ECRASEMENT PAR CHARGE EXCENTRIQUE (coefficient de réduction pour murs avec élancement de 7 à 8 - épaisseur 30 cm)	R		> 0,50	0,40 0,50	0,30 0,40	0,20 0,30
RESISTANCE A LA FLEXION (pression horizontale uniforme - vent)		MPa	5.10^{-3} 6.10^{-3}	4.10^{-3} 5.10^{-3}	3.10^{-3} 4.10^{-3}	2.10^{-3} 3.10^{-3}
RESISTANCE A UNE POUSSEE HORIZONTALE LOCALISEE (pression par un disque de 2,5 cm de diamètre - murs h = 2,50 m, L = 1,20 m, l = 30 cm)		N	> 4.500			
COEFFICIENT DE DILATATION THERMIQUE		mm/m° C	< 0,010	0,010 0,015		

Les valeurs indiquées ici proviennent de recherches menées dans des laboratoires qui font autorité en la matière. Elles sont indicatives de ce que l'on peut raisonnablement attendre d'un produit confectionné selon les règles de l'art.

1) Compressé à 20 daN/cm²
2) Stabilisé à 8 % ciment
   Compressé à 20-40 daN/cm²
3) Latérite stabilisée 12 à 19 % chaux
   Compressé à 300 daN/cm²
   Etuvé à 95 % HR sous pression à 90° C
4) Coup de sable
5) Stabilisé à 5-9 % d'émulsion de bitume
6) Compressé à 90-95 % Proctor Standard
7) Idem. Stabilisé à 8 % ciment
8) Produits creux de 1 100 kg/m³
   Stabilisé au ciment 15 % min.
9) Double face sur claye de branches
10) 600 à 800 kg/m³
11) Indiquer valeurs dans votre région
12) Indiquer valeurs dans votre région

I BLOCS COMPRESSES			II ADOBE		III PISE		IV BRIQUES ETIREES	V TORCHIS	VI TERRE PAILLE	VII BRIQUES CUITES	VIII BLOCS CIMENT
1 CRU	2 STA	3 STA	4 CRU	5 STA	6 CRU	7 STA	8 STA	9 CRU	10 CRU	11	12
	B		B	C	B	C					
	A	A	B	D	C	A					
	A		D	C	D	A					
	A		A	A	A	A					
						B					

CARACTERISTIQUES	S	U	CLASSES A	B	C	D
GONFLEMENT (immersion jusqu'à saturation)		mm/m	0 0,5	0,5 1	1 2	> 2
RETRAIT (sèchage artificiel jusqu'à stabilisation)		mm/m	0 1	1 2	2 5	> 5
RETRAIT DE SECHAGE		mm/m	< 0,2	0,2 1	1 2	> 1
PERMEABILITE		mm/sec		1×10^{-5}		
ABSORPTION D'EAU PAR LA FACE A ENDUIRE		% (POIDS)	0 5	5 10	10 20	> 20
ABSORPTION TOTALE		Kg/m^3	0 7,5	5 10	10 20	> 20
SUSCEPTIBILITE A LA GELIVITE			PAS	PEU	SENSI-BLE	TRES SENS.
SUSCEPTIBILITE AUX EFFLORESCENCES			TRES PEU	PEU	SENSI-BLE	TRES SENS.
DURABILITE SOUS EXPOSITION AUX INTEMPERIES (simple mur sans protection)			EXCEL-LENT	BON	MOYEN	FAIBLE

Les valeurs indiquées ici proviennent de recherches menées dans des laboratoires qui font autorité en la matière. Elles sont indicatives de ce que l'on peut raisonnablement attendre d'un produit confectionné selon les règles de l'art.

1) Compressé à 20 daN/cm²
2) Stabilisé à 8 % ciment
Compressé à 20-40 daN/cm²
3) Latérite stabilisée 12 à 19 % chaux
Compressé à 300 daN/cm²
Etuvé à 95 % HR sous pression à 90° C
4) Coup de sable
5) Stabilisé à 5-9 % d'émulsion de bitume
6) Compressé à 90-95 % Proctor Standard
7) Idem. Stabilisé à 8 % ciment
8) Produits creux de 1 100 kg/m³
Stabilisé au ciment 15 % min.
9) Double face sur claye de branches
10) 600 à 800 kg/m³
11) Indiquer valeurs dans votre région
12) Indiquer valeurs dans votre région

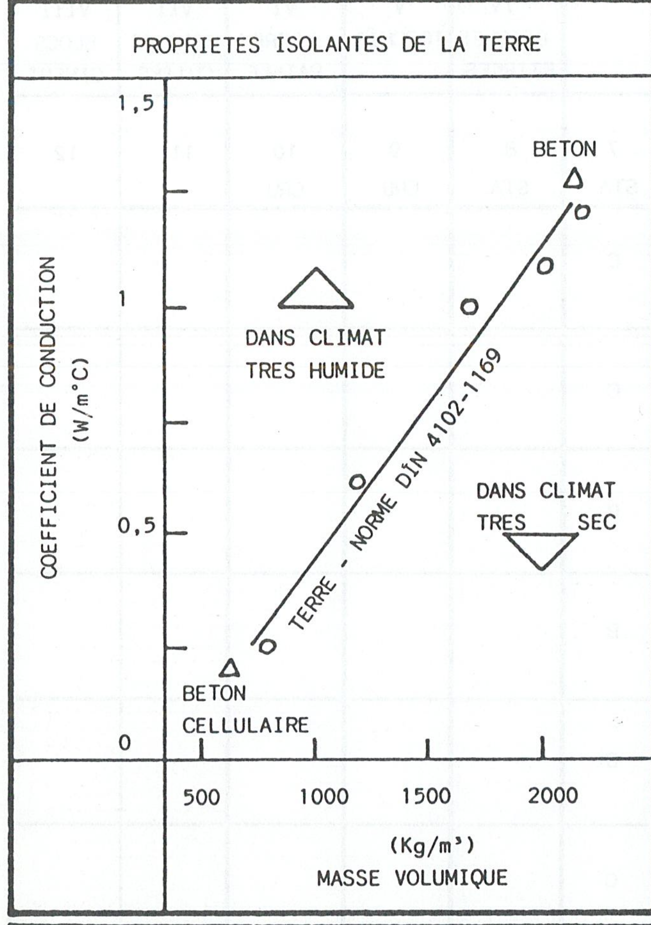
I BLOCS COMPRESSES			II ADOBE		III PISE		IV BRIQUES ETIREES	V TORCHIS	VI TERRE PAILLE	VII BRIQUES CUITES	VIII BLOCS CIMENT
1 CRU	2 STA	3 STA	4 CRU	5 STA	6 CRU	7 STA	8 STA	9 CRU	10 CRU	11	12
							C/D				
							C				
B	B		B	B	C	C					
	B					B					
				A			A				
	C	A				C	C				
D	B	A	D	B	C	B	A/B				
B	B	A			B	B					
D	B	A	D	B	C	A	B				

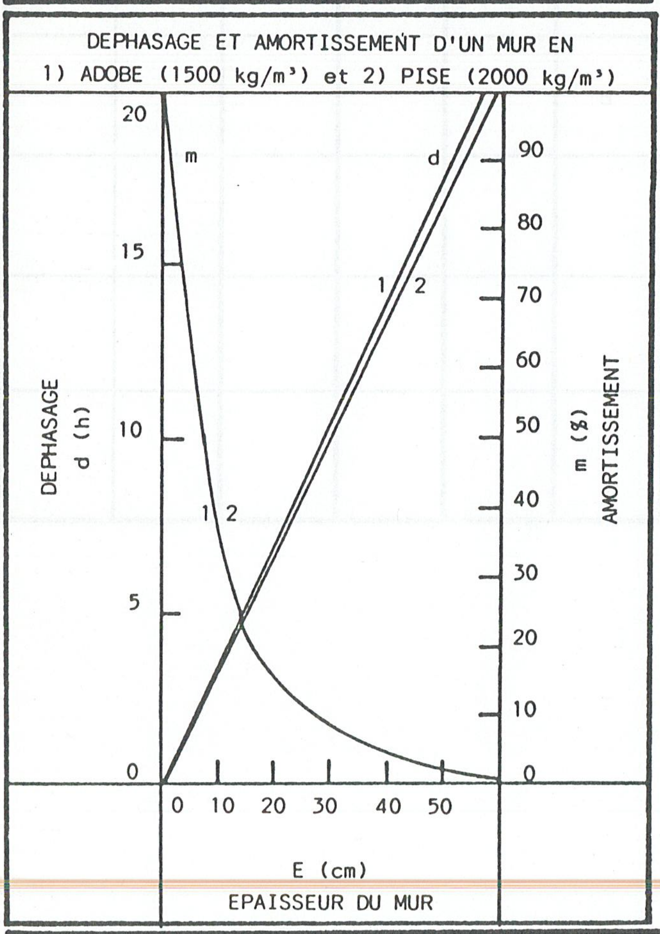
CARACTERISTIQUES	S	U	CLASSES			
			A	B	C	D
CHALEUR SPECIFIQUE	C	KJ/Kg	1,00 0,85	ENVIR. 0,85	0,65 0,85	<0,65
COEFFICIENT DE CONDUCTION (dépend fortement de la densité apparente - se référer à cette rubrique)	λ	W/m°C	0,23 0,46	0,46 0,81	0,81 0,93	0,93 1,04
COEFFICIENT D'AMORTISSEMENT (mur de 40 cm)	m	%	< 5	5 10	10 30	> 30
COEFFICIENT DE DEPHASAGE (mur de 40 cm)	d	h	>12	10 12	5 10	< 5
COEFFICIENT D'AFFAIBLISSEMENT ACOUSTIQUE (mur de 40 cm à 500 Hz)		dB	>60	50	40	30
COEFFICIENT D'AFFAIBLISSEMENT ACOUSTIQUE (mur de 20 cm à 500 Hz)		dB		60	50	40
RESISTANCE AU FEU			EXCEL.	BON	MOYEN	FAIBLE
INFLAMMABILITE			TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT
VITESSE DE PROPAGATION DES FLAMMES			TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	FORT

Les valeurs indiquées ici proviennent de recherches menées dans des laboratoires qui font autorité en la matière. Elles sont indicatives de ce que l'on peut raisonnablement attendre d'un produit confectionné selon les règles de l'art.

1) Compressé à 20 daN/cm²
2) Stabilisé à 8 % ciment
Compressé à 20-40 daN/cm²
3) Latérite stabilisée 12 à 19 % chaux
Compressé à 300 daN/cm²
Etuvé à 95 % HR sous pression à 90° C
4) Coup de sable
5) Stabilisé à 5-9 % d'émulsion de bitume
6) Compressé à 90-95 % Proctor Standard
7) Idem. Stabilisé à 8 % ciment
8) Produits creux de 1 100 kg/m³
Stabilisé au ciment 15 % min.
9) Double face sur claye de branches
10) 600 à 800 kg/m³
11) Indiquer valeurs dans votre région
12) Indiquer valeurs dans votre région

I BLOCS COMPRESSES			II ADOBE		III PISE		IV BRIQUES ETIREES	V TORCHIS	VI TERRE PAILLE	VII BRIQUES CUITES	VIII BLOCS CIMENT
1 CRU	2 STA	3 STA	4 CRU	5 STA	6 CRU	7 STA	8 STA	9 CRU	10 CRU	11	12
B	C		B	B	B	C					
C	C	D	B	B	C	C					
B	B	B			B	B					
B	B	B			B	B					
B	B	B			B	B					
C	C	C			C	C					
B	B	B	B		B	B					





L'inertie thermique des maisons en terre est reconnue mais cette qualité ne résoud pas tous les problèmes thermiques. La terre ne jouit pas de ces propriétés thermiques d'allure mythique dont on a bien voulu la doter. Le matériau n'est pas très isolant et sa capacité thermique est très inférieure à celle d'un béton plein, à volume égal : 590 (Wh/m³° C) pour le béton, 510 (Wh/m³° C) pour le pisé et 380 (Wh/m³° C) pour l'adobe (1). Il importe donc de cerner les caractéristiques thermophysiques de ce matériau pour mieux l'utiliser. On constate aujourd'hui une rareté de données. La littérature spécialisée ancienne fait état d'expériences isolées menées par divers Centres de Recherche dans des conditions très différentes limitant les comparaisons. Des programmes de recherche actuellement engagés en plusieurs pays permettront de préciser les propriétés thermiques de la terre. Les premiers résultats seront connus à partir de 1984-85 (p.e., le Thermal Mass Study, New Mexico Energy Institute et Bickle Group Albuquerque, N.M., U.S.A.). Dans l'attente de ces nouvelles données, la littérature ancienne permet de dresser des courbes et d'annoncer des caractéristiques assez fiables. Par exemple, la relation entre le coefficient λ de conductivité thermique (W/m° C) et la masse volumique du matériau (kg/m³) est très proche de celle des autres matériaux minéraux. Il faut toutefois considérer la variation de la densité du matériau à la mise en oeuvre. Celle-ci est notoire pour des techniques du pisé et de la terre-paille, tributaires de la vigueur du damage. La courbe des λ ci-jointe est établie pour une teneur en eau d'équilibre moyenne, en climat tempéré, de l'ordre de 2,5 % en poids. Il s'agit là de la moyenne la moins favorable. Le λ peut varier du simple au double pour une variation de la teneur en eau de 1 % à 7 %. Cette variation de la teneur en eau est classique pour des murs de terre non stabilisée, entre l'été et l'hiver sous climat tempéré, entre une région sèche(Sahel) et une région humide (Tropiques côtiers). On ne peut donc retenir la même valeur du λ dans les calculs, selon les régions climatiques. Les résultats d'observations empiriques permettent d'évaluer une variation de 15 % du λ pour une variation de 1 % de la teneur en eau. Pour la chaleur spécifique de la terre, la littérature donne une valeur comprise entre 800 et 1 000 (J/kg° C).

Ces valeurs données pour des matériaux secs peuvent augmenter avec l'importance de la teneur en eau résiduelle. La connaissance des propriétés d'effusivité et de diffusivité thermiques de matériau précise le comportement dynamique des murs de terre (2). Ces caractéristiques sont également

très similaires à celles d'autres matériaux minéraux. L'effusivité qui considère la transmission d'une onde thermique dans la masse d'une paroi par une face et sa restitution par cette même face définit l'aptitude au stockage du matériau. Avec une chaleur volumique moins élevée que pour d'autres matériaux plus lourds, la capacité de stockage de la terre - logiquement amoindrie - demeure excellente. La terre bénéficie d'une inertie latente liée à sa capacité d'absorption. La lenteur de la migration d'eau dans les murs de terre améliore la capacité de stockage pour des cycles longs (annuels). La diffusivité exprime le déphasage et l'amortissement d'une onde thermique à travers la paroi. Avec une faible diffusivité, la terre offre l'avantage d'un amortissement et d'un déphasage importants des variations et des apports thermiques externes. Cette propriété est surtout intéressante pour des régions à ambiances climatiques externes très variables. Le grand avantage de la terre réside dans la possibilité de faire varier aisément le poids spécifique du matériau lors de la mise en oeuvre. C'est notamment le cas de la technique de la terre-paille dont la densité peut varier de 300 à 1 300 kg/m³. On peut ainsi moduler à souhait le stockage, l'amortissement et le déphasage, l'isolation, en jouant sur le poids et l'épaisseur des parois, répondant ainsi aux nécessités du calcul thermique. Au-delà du mythe, les caractéristiques thermophysiques de la terre peuvent être considérées comme bonnes mais les calculs doivent intégrer les variations dues au comportement hygrothermique du matériau.

EPAISSEUR DE MUR NECESSAIRE POUR UN AMORTISSEMENT EGAL A CELUI D'UN MUR EN BRIQUES CUITES DE 36,5 CM (TEMPS DE REFROIDISSEMENT : 82 H)

MATERIAU SANS ENDUIT	MASSE VOL. (Kg/m³)	EPAISSEUR DU MUR (CM)
TERRE-PAILLE	300	28
TERRE-PAILLE	400	27
FIBRES BOIS CIMENT	400	17
TERRE-PAILLE	600	28
BETON CELLULAIRE	600	30
PANNEAU FIBRES	600	17
TERRE-PAILLE	800	29
BRIQUE CREUSE	800	35
TERRE-PAILLE	1000	31
TERRE-PAILLE	1200	35
ADOBE	1400	35
ADOBE	1600	36
BRIQUE CUITE	1800	36,5
PISE	1800	39
BETON LOURD	2400	52

ISOLATION OBTENUE AVEC UNE EPAISSEUR DE MUR NECESSAIRE POUR EGALER L'AMORTISSEMENT D'UN MUR EN BRIQUES CUITES DE 36,5 CM.

MATERIAU SANS ENDUIT	MASSE VOL. (Kg/m³)	$1/\lambda$ (m²°C/W)
TERRE-PAILLE	300	2,80
TERRE-PAILLE	400	2,25
FIBRES BOIS CIMENT	400	1,83
TERRE-PAILLE	600	1,65
BETON CELLULAIRE	600	1,58
PANNEAU FIBRES	600	1,31
TERRE-PAILLE	800	1,16
BRIQUE CREUSE	800	1,06
TERRE-PAILLE	1000	0,86
TERRE-PAILLE	1200	0,74
ADOBE	1400	0,59
ADOBE	1600	0,49
BRIQUE CUITE	1800	0,45
PISE	1800	0,43
BETON LOURD	2400	0,24

On pense souvent à tort qu'il n'existe aucune norme pour la construction en terre mais on connaît à ce jour plusieurs tentatives de normalisation du matériau. Les textes connus, éparpillés dans une littérature mondiale, rassemblent assez de données pour être adaptés au plus large spectre de contextes et de conditions d'emploi du matériau et au plus grand registre de besoins des pays demandeurs. Si les normes n'ont que peu d'importance pour des petits projets du type habitat individuel, il n'en va pas de même pour des projets de grande envergure de plus en plus fréquents. Des textes de référence sont aujourd'hui indispensables dans certains pays où le contrôle technique est très strict. Dans la plupart des pays en développement,la construction en terre s'effectue souvent sous garantie des savoir-faire ou des compétences d'une assistance technique mais aussi sous garantie des instances officielles. Des normes sont pourtant réclamées par les décideurs et les financeurs, les constructeurs. Les textes qui existent sont le plus souvent des recommandations techniques ou des guides pratiques qui ne couvrent pas l'ensemble des techniques, étant souvent limités à l'adobe, au bloc comprimé ou au pisé. Les questions qui y sont traitées relèvent principalement de l'étude du comportement structural et thermique, des méthodes d'essais mais négligent tout un ensemble de points importants relatifs à la production et à la mise en oeuvre. On constate plusieurs attitudes de la part des codificateurs :

- Le matériau est volontairement dévalorisé et ignoré, il n'apparaît pas dans les textes.
- La construction en terre est jugée connue et relève de l'évidence; il n'est pas utile de la normaliser. Cette attitude entend résoudre les problèmes qui émanent des organismes de décision, de financement et de contrôle.
- Des exigences trop poussées sont réclamées qui risquent de contrarier le développement de la technologie de la terre.
- Certains pensent que les normes sont un outil nécessaire au développement de la construction en terre et souhaitent établir des codes assez souples. Dans ce cas, les textes sont très didactiques, souvent modifiés pour être adaptés en permanence à la réalité de l'emploi du matériau. Les codes influencent la pratique qui modifie en retour les codes.

L'absence de normes ne peut plus être invoquée pour empêcher l'emploi de la terre comme matériau de construction. De nombreux organismes spécialisés peuvent établir des codes de bonne pratique qui feraient office de textes normatifs vis-à-vis des acteurs d'un projet construit en terre. Nous citons quelques textes normatifs de qualité, pour divers pays, non limitatifs. Les fiches de ce manuel reprennent une grande part de l'information contenue dans ces textes.

U. S. A. : Dès 1941, le "National Bureau of Standards" entreprend une étude des caractéristiques de l'adobe, du bloc comprimé et du pisé. Un document est publié :
- Report B.M.S. 78 - Structural, Heat-Transfer and Water-Permeability Properties of Five Earth-Wall Constructions, 1941.

Deux ans plus tard, le "United States Department of Interior Office of Indian Affairs"publie des codes de bonne pratique et des spécifications techniques :
- Earth Brick Construction, U.S. Office of Indian Affairs, 1943.

Aujourd'hui, aux U.S.A., la construction en adobe est intégrée aux codes de construction nationaux.
- Uniform Building Code Standards - Section 24-15, 2403 Unburned Clay Masonry Units and Standards. Methods of sampling and testing. Unburned Clay Masonry Units. Recommanded standards of the International Conference of Building Officials, 1973.
- Uniform Building Code Section 2405 - Unburned Clay Masonry, 1973.

Plusieurs états ont apporté des amendements à ces standards nationaux. C'est le cas de l'Arizona, du Nouveau Mexique, de la Californie, du Nevada, de l'Utah, du Colorado, du Texas. En 1983, certains Etats ont règlementé la construction en pisé, en blocs comprimés et même en mottes de gazon.

FRANCE : Lors de la reconstruction suivant la Seconde Guerre Mondiale, trois textes de caractère officiel sont publiés :
- REEF DTC 2001 Béton de terre et béton de terre stabilisé, 1945.
- REEF DTC 2101 Constructions en béton de terre, 1945.
- REEF DTC 2102 Béton de terre stabilisé aux liants hydrauliques, 1945.

Pour le projet du Village Terre de l'Isle d'Abeau (63 logements), un cahier des charges spécial a été préparé. Ce document de caractère officieux sert de référence aux financeurs, assureurs, maître d'ouvrage, architecte et entreprises et au contrôle technique :
- Recommandations pour la conception des bâtiments du Village Terre - Plan Construction, 1982.

Les caractéristiques thermiques de la terre sont publiées dans les cahiers du C.S.T.B. :
- N° 215. Cahier 1682. 198.

ALLEMAGNE : Ce pays est l'un des premiers qui ait élaboré des normes. Dès 1944 sont publiées les premières normes DIN. Entre 1944 et 1956, une série de normes et de pré-normes entrent en vigueur. Ces textes jugés dépassés sont retirés en 1971.

- DIN 18951 Blatt 1 Lehmbauten (lehmbauordnung) Vorschrifter für die Ausführung/Blatt 2 dsgl. Erlaüterung, 1951. Ce texte est adjoint de commentaires officieux :
- Lehmbauordnung nebst bäuer lichen Siedlungsrichtlinien-Hölsher Wambsganz Dittus, 1948.
- DIN 18952, pré-norme, Blatt 1 Baulehm Begriffe, Arten, 1956/Blatt 2 Prüfung von Baulehm, 1956.
- DIN 18952, projet, Lehm als Baustoff, 1951.
- DIN 18953, pré-norme, Blatt 1 Baulem Lehmbauteile Verwendung von Baulehm, 1956/Blatt 2 dsgl. gemauerte Lehmwände, 1956/Blatt 3 dsgl. gestampfte Lehmwände, 1956/Blatt 4 dsgl. gewellerte Lehmwände, 1956/Blatt 5 dsgl. Leichtlehmwände in Gerippebauten, 1956/Blatt 6 dsgl. Lehmfusshöden, 1956.
- DIN 18953, projet, Lehmbau, Eigenschaften, Bauarten, Anwendungsbereich, 1951.
- DIN 18954, pré-norme, Ausführung von Lehmbauten Richtlinien, 1956.
- DIN 18955, pré-norme, Baulehm, Lehmbauteile Feuchtigkeitsschutz, 1956.
- DIN 18956, pré-norme, Putz auf Lehmbauteilen, 1956.
- DIN 18957, pré-norme, Lehmschindeldach, 1956.

En plus de ces normes qui couvrent les techniques du pisé, du bloc comprimé, de l'adobe, de la terre-paille et du torchis, la littérature allemande abonde en manuels de construction très détaillés et pratiques. Les caractéristiques thermiques de la terre sont toujours intégrées aux normes : DIN 4108, 1981.

COTE D'IVOIRE : Ce pays s'est doté d'un texte normatif :

- Recommandations pour la conception et l'exécution de bâtiments économiques en géobéton. LBTP, 1980.

PEROU : Ce pays dispose de normes officielles sur la construction antisismique en adobe :

- Normas de diseño, sismo resistente constructiones de Adobe y bloque establizado. RNC. Reglamento National de constructiones. Resolucion Miniserial n° 159-77/UC-110°, 1977.
- Itintec 331.201. Diciembre, 1978, 9 p. "Elementos de suelo sin cocer : adobe estabilizado con asfalto para muros : Requisitos".
- Itintec 331.202. Diciembre, 1978, 8 p. "Elementos de suelo sin cocer : adobe estabilizado con asfalto para muros : metodos de ensayo".
- Itintec 331.203. Diciembre, 1978, 4 p. "Elementos de suelo sin cocer : adobe estabilizado con asfalto para muros : muestra y recepcion".

INDE : C'est un des rares pays à avoir préparé des normes officielles :

- Specification for soil-cement blocks used in general building construction, IS 1725, Indian Standards Institute, New Delhi, 1960.

NATIONS-UNIES : Deux codes de bonne pratique d'une valeur exceptionnelle ont été élaborés par les Nations-Unies :

NATIONS-UNIES : Deux codes de bonne pratique d'une valeur exceptionnelle ont été élaborés par les Nations-Unies :

- 58/II/H/4, Manuel de construction d'habitations en Béton de Terre Stabilisé. Fitzmaurice, R., 1958.
- 64.IV.6, Le Béton de Terre Stabilisé, son emploi dans la construction, 1964.

Dans le cadre du projet de Cissin, à Ouagadougou, Haute-Volta, le PNUD a établi un texte normatif :

- Cahier des charges dressé pour le projet Cissin, 1973.

D'AUTRES PAYS : ont élaboré des textes de référence qui n'ont pas un caractère officiel; nous en citons ici quelques uns : la Tanzanie, le Ghana, le Mozambique, le Maroc, le Mexique, le Brésil, l'Australie, l'U.R.S.S., la Turquie ...

RILEM : Le conseil général de la RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de recherche sur les Matériaux et les constructions), réuni en septembre 1982 a officiellement créé un nouveau Comité Technique 63 - LBM "Laterite-based materials". Ce comité élaborera des pré-normes, des recommandations et des spécifications techniques sur les blocs de latérite comprimée. Des textes seront probablement publiés en 1986 et seront sans doute adoptés comme pré-normes par les pays membres.

- AGRA. Recommandations pour la conception des bâtiments du village terre. Grenoble, AGRA, 1982.
- Bernard, P.A. L'inertie, facteur d'économie de chauffage. In Moniteur BTP, Paris, 1979.
- Diaz Pedregal, P. Les caractéristiques thermiques de la terre: du mythe à la réalité. In Revue de l'habitat social, Paris, Union Nationale HLM, 1981.
- Diaz Pedregal, P. Les caractéristiques thermophysiques de la terre. In solaire, Paris, 1981.
- Grésillon, J.M. Etude de l'aptitude des sols à la stabilisation au ciment. Application à la construction. In annales de l'ITBTP, Paris, ITBTP, 1978.
- Mukerji, K.; Bahlmann, H. Laterit zum bauen. Stamberg, IFT, 1978.
- Penicaud, H. Caractéristiques hygrothermiques du matériau terre. In colloque Actualité de la construction en terre en France, Lyon, PCH, 1982.
- Pollet, H. Un nouveau matériau de construction obtenu par la réaction argilo-calcaire. Paris, RILEM, 1970.
- Simonnet, J. Recommandations pour la conception et l'exécution de bâtiments en géobéton. Abidjan, LBTP, 1979.
- Volhard, F. Leichtlehmbau. Karlsruhe, CF Müller GmbH, 1983.
- Wittemore, H. et al. Building materials and structures. Washington, US Printing Office, 1941.

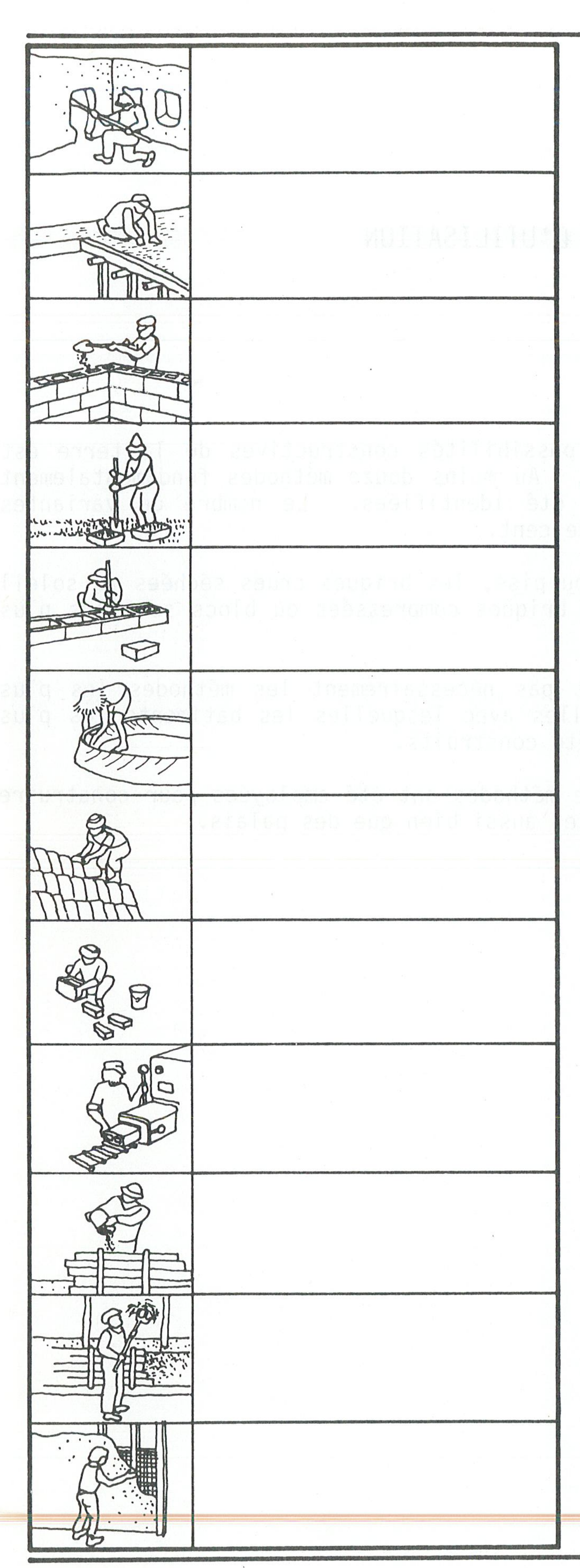
800 MODES D'UTILISATION

La palette des possibilités constructives de la terre est très importante. Au moins douze méthodes fondamentalement différentes ont été identifiées. Le nombre de variantes s'élève à près de cent.

La terre damée ou pisé, les briques crues séchées au soleil ou adobe et les briques compressées ou blocs sont les plus connues.

Mais ce ne sont pas nécessairement les méthodes les plus employées ni celles avec lesquelles les bâtiments les plus importants ont été construits.

Toutes les douze méthodes ont été employées pour construire des abris modestes aussi bien que des palais.



1 - TERRE CREUSEE
L'habitation est creusée dans l'épaisseur de l'écorce terrestre : habitat troglodytique.

2 - TERRE COUVRANTE
La terre recouvre une structure construite avec un autre matériau.

3 - TERRE REMPLISSANTE
La terre remplit des matériaux creux employés comme enveloppe.

4 - TERRE DECOUPEE
Des blocs de terre sont directement découpés dans la masse du sol.

5 - TERRE COMPRIMEE
Des éléments sont réalisés avec une terre comprimée dans des moules ou des coffrages.

6 - TERRE FACONNEE
La terre plastique est façonnée à la main pour dresser des murs minces.

7 - TERRE EMPILEE
Des boules de terre sont empilées pour constituer des murs épais.

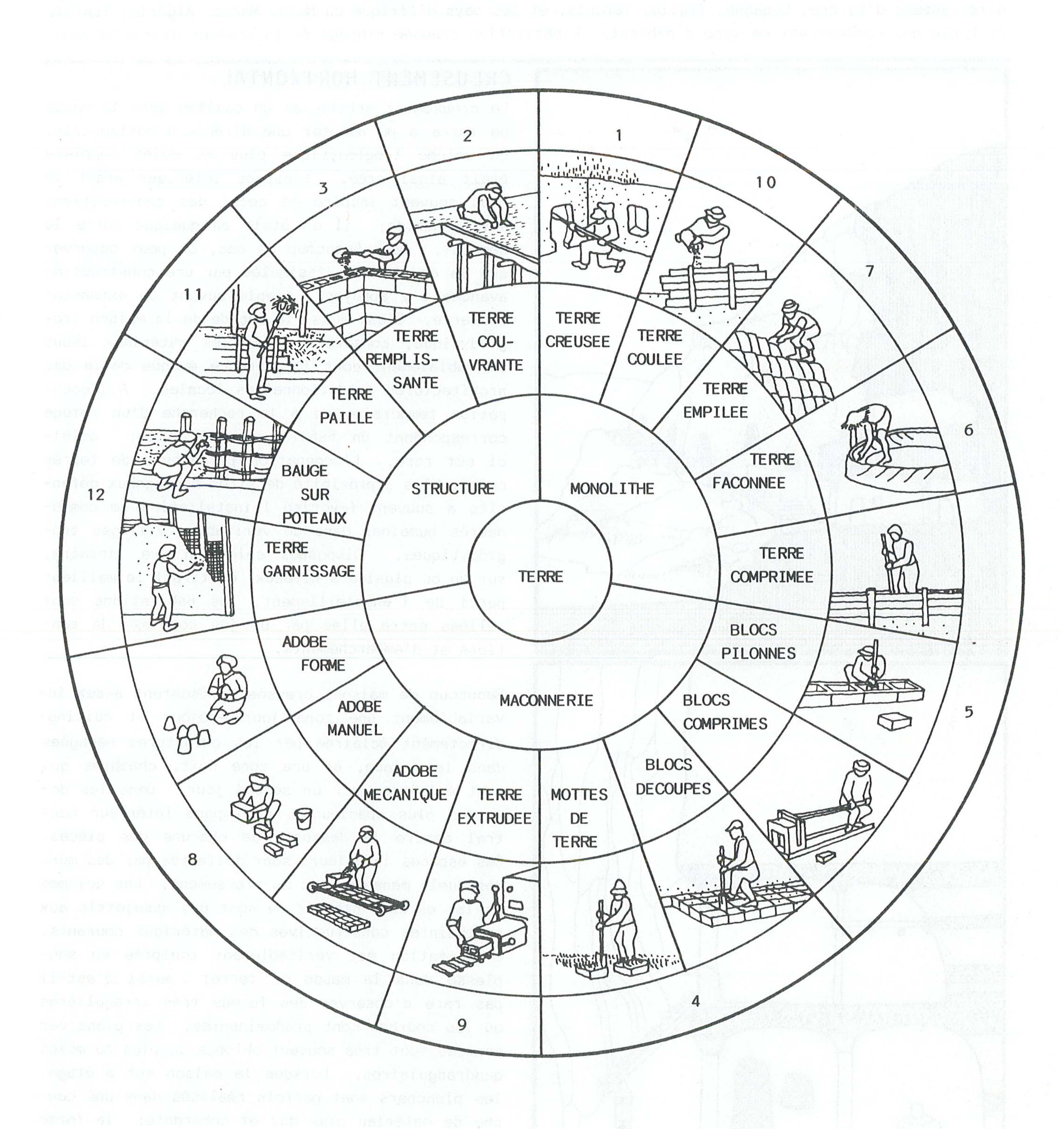
8 - TERRE MOULEE
La terre est moulée à la main ou à l'aide de moules en formes diverses.

9 - TERRE EXTRUDEE
La terre est extrudée par une puissante machine.

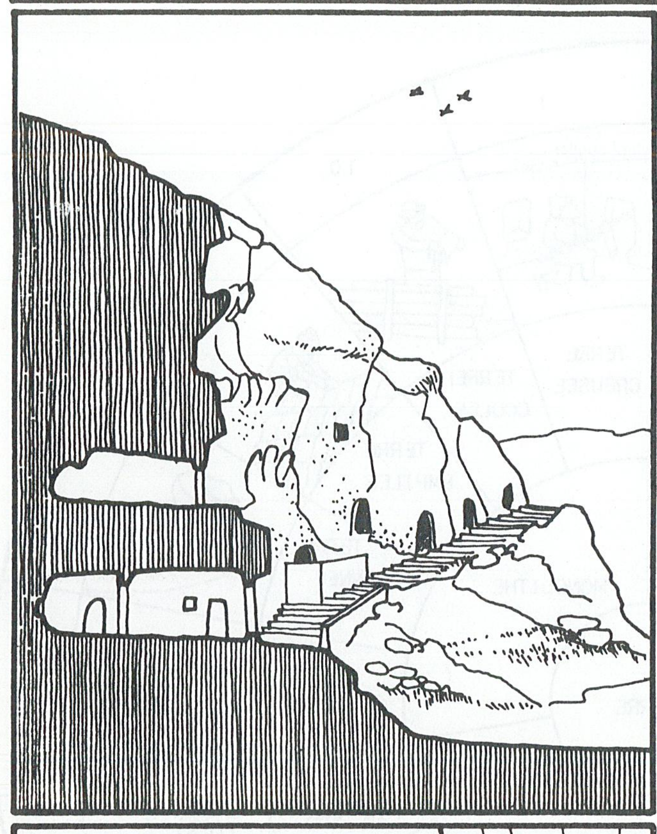
10 - TERRE COULEE
La terre est coulée dans des coffrages ou dans des moules comme un béton.

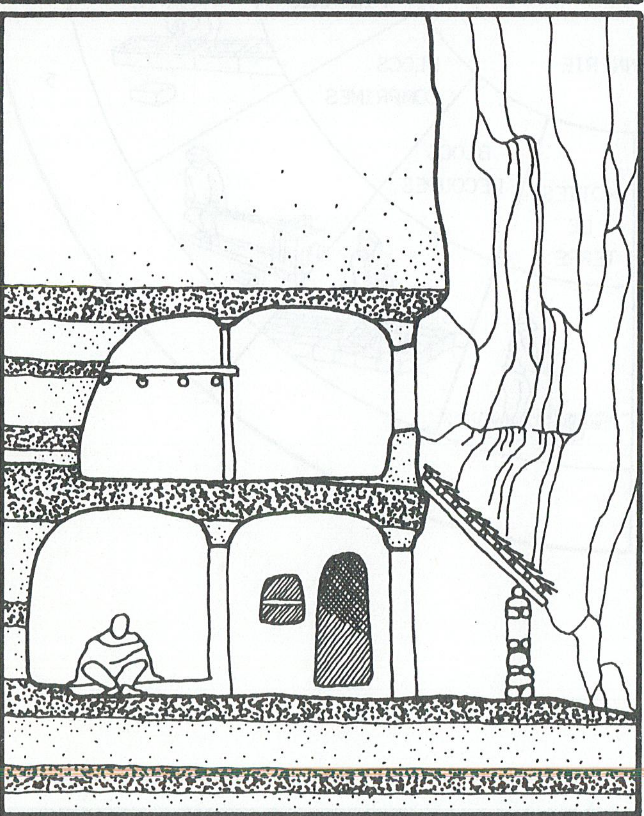
11 - TERRE-PAILLE
Une barbotine argileuse lie des fibres et constitue un matériau léger.

12 - TERRE GARNISSAGE
La terre mêlée de fibres est appliquée en couche mince pour garnir un support.


TERRE
STRUCTURE
MONOLITHE
MACONNERIE
TERRE CREUSEE
TERRE COULEE
TERRE EMPILEE
TERRE FACONNEE
TERRE COMPRIMEE
BLOCS PILONNES
BLOCS COMPRIMES
BLOCS DECOUPES
MOTTES DE TERRE
TERRE EXTRUDEE
ADOBE MECANIQUE
ADOBE MANUEL
ADOBE FORME
TERRE GARNISSAGE
BAUGE SUR POTEAUX
TERRE PAILLE
TERRE REMPLIS-SANTE
TERRE COU-VRANTE
1
10
7
6
5
4
9
8
12
11
3
2

La géographie mondiale de l'architecture troglodytique montre une implantation très dépendante du climat et de la nature du sol. Dans la plupart des cas, les sites sont creusés dans des sols tendres, tuf, loess ou lave poreuse, et sont établis sous des climats chauds et secs. Similairement, l'habitat creusé dans le loess, en Chine et en Tunisie occupe une zone désertique et de steppe. Ce sont les pays méditerranéens d'Europe, Espagne, Italie, Turquie, et les pays d'Afrique du Nord, Maroc, Algérie, Tunisie et Lybie qui concentrent ce type d'habitat. L'habitation creusée protège de la chaleur diurne et amor-





CREUSEMENT HORIZONTAL

Le creusement artificiel de cavités dans la masse de terre a pu adopter une direction horizontale. Un volume troglodytique plus ou moins complexe était ainsi créé. L'espace intérieur était le plus souvent inspiré de celui des constructions environnantes; il en était en quelque sorte le négatif. Dans beaucoup de cas, on peut observer que la cavité est dissimulée par une construction avancée s'y appuyant, simple auvent ou extension couverte. C'est aussi la façade de la maison troglodytique, construite avec les matériaux issus du déblaiement dont l'apparence évoque celle des architectures traditionnelles locales. A l'occupation temporaire ou à la recherche d'un refuge correspondent un habitat creusé isolé; celui-ci est rare. L'occupation permanente de terres cultivables à proximité de sites montagneux défensifs a souvent favorisé l'installation de communautés humaines dans de véritables villages troglodytiques. Disposées selon un axe linéaire, sur un ou plusieurs niveaux, et tirant le meilleur parti de l'ensoleillement, les habitations sont reliées entre elles par un jeu complexe de sentiers et d'emmarchements.

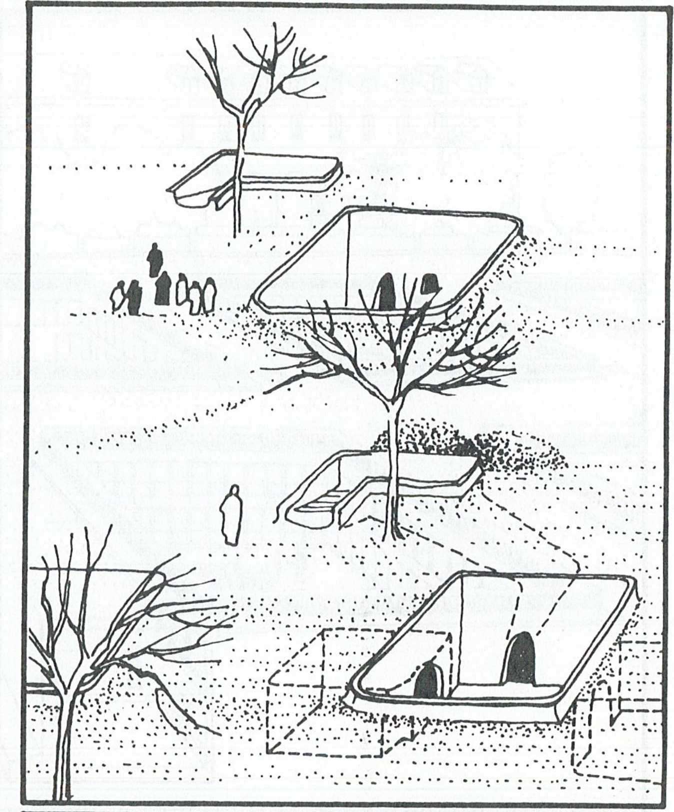
Beaucoup de maisons creusées présentent assez invariablement une zone jour -séjour et cuisine- directement éclairée par les ouvertures ménagées dans la façade, et une zone nuit, chambres qui sont éclairées par un second jour. Dans les demeures plus spacieuses, un espace intérieur central assure la desserte de chacune des pièces. Ces espaces intérieurs sont délimités par des murs résiduels ménagés lors du creusement. Les volumes et les espaces creusés ne sont pas assujettis aux contraintes constructives des matériaux courants. L'habitation est véritablement sculptée en souplesse dans la masse de terre; aussi n'est-il pas rare d'observer des formes très irrégulières où les courbes sont prédominantes. Les plans des espaces sont très souvent oblongs ou plus ou moins quadrangulaires. Lorsque la maison est à étage, les planchers sont parfois réalisés dans une couche de matériau plus dur et cohérente; la forme voûtée ou en arc surbaissé, brisé, en dôme du plafond assure la stabilité du système. Ce peut être également une structure traditionnelle en bois - poteaux, poutres et solives, planches - permettant un aménagement libre d'un plus vaste volume.

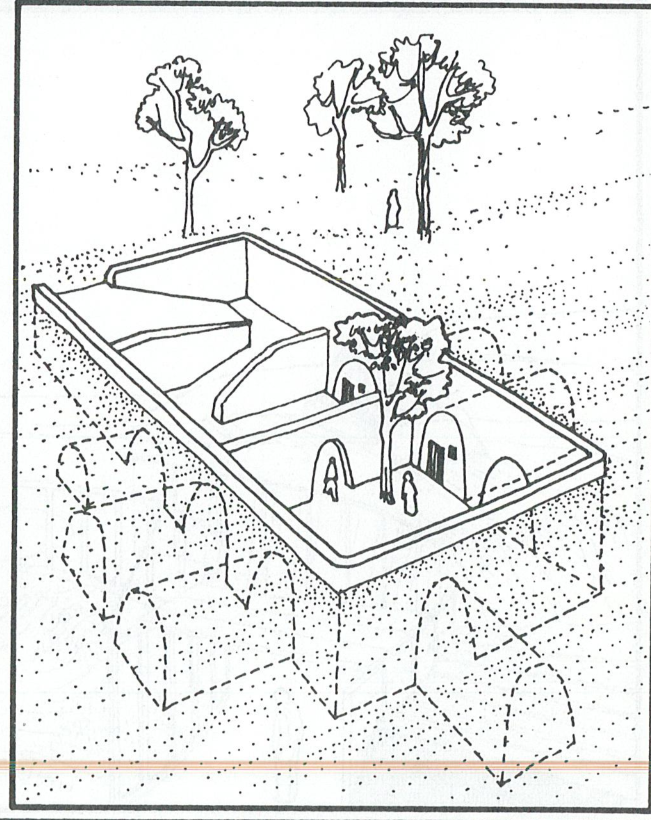
tit les différences de température entre le jour et la nuit grâce à un effet de volant thermique de la masse de terre. Outre une volonté de défense, c'est aussi un manque de techniques de construction et de matériaux (extraction, transport et mise en oeuvre longs et coûteux) qui poussèrent les hommes à habiter la profondeur du sol. Aujourd'hui, les concentrations urbaines, le gaspillage d'espace et d'énergie, induisent une nouvelle forme de troglodytisme. L'urbanisme aérien fait place à un urbanisme souterrain aux dimensions parfois tentaculaires.

CREUSEMENT VERTICAL

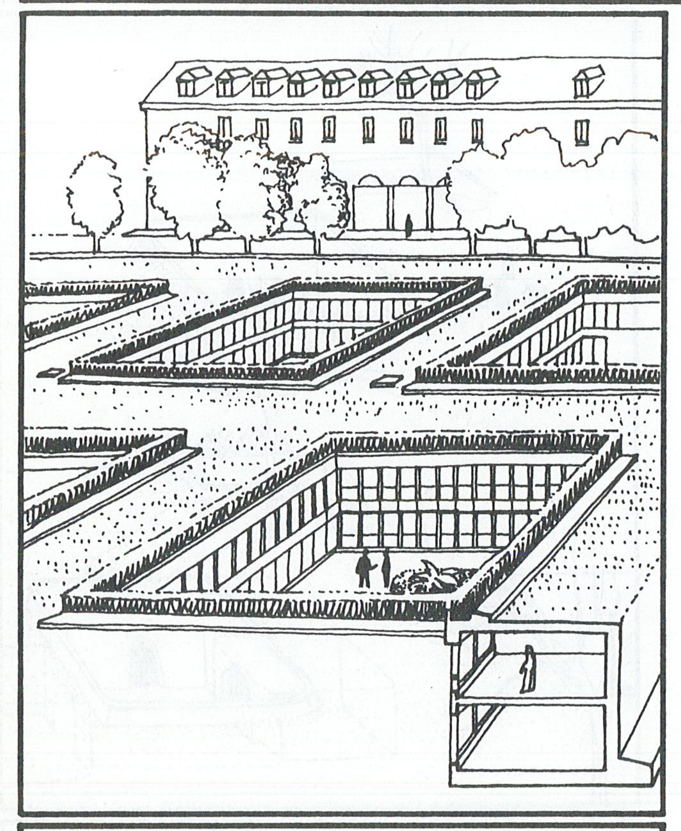
En site plat de plateaux ou de plaines, le creusement de l'habitation troglodytique adopte une direction verticale au sol. Les fosses, plus ou moins pénétrantes dans l'épaisseur du sol sont généralement reliées à la surface par une rampe ou par un escalier en pente douce. Cette morphologie correspond tout autant aux Matmata de Tunisie qu'à l'habitat creusé dans le loess des provinces de Honnan, Shansi, Shensi et Kansu où vivent près de 10 millions de Chinois.

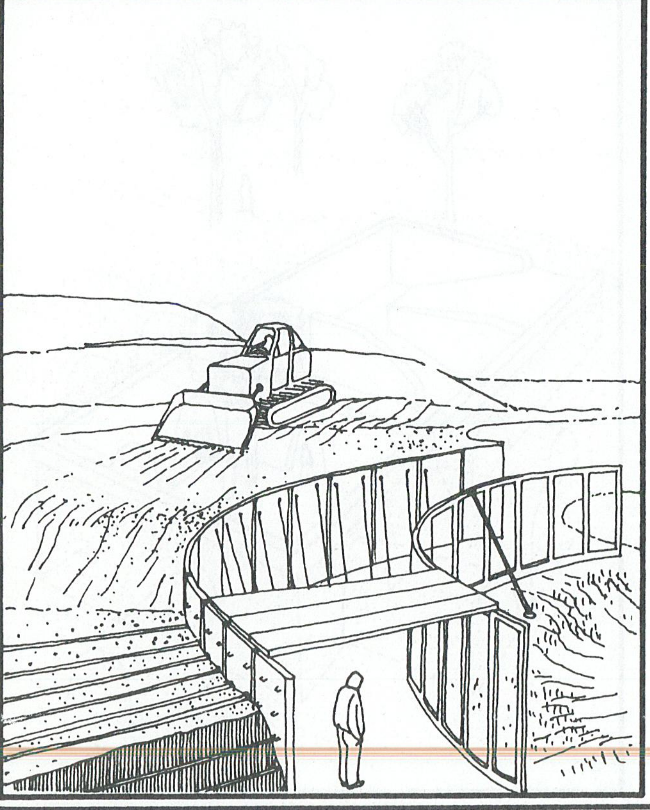
En Chine, il s'agit d'un véritable urbanisme troglodytique où voisinent selon un maillage régulier des milliers d'habitations mais également des ateliers d'artisans, des petites industries, des écoles, des bureaux, des hôtels. Dans la région de Loyang, les fosses sont profondes de 9 à 10 mètres et définissent un patio rectangulaire d'environ 200 à 250 m². C'est autour de ce patio que s'organise l'habitation. Les pièces sont creusées dans les parements verticaux de la fosse-patio. Ce sont des pièces voûtées avec des portées courtes car la terre travaille très mal en flexion. Ces maisons sont, à la fois, abritées des vents dominants, aérées par le patio et remarquablement tempérées, quels que soient les extrêmes climatiques saisonniers. L'habitat creusé pose deux problèmes majeurs : l'érosion et la collecte des eaux pluviales. Les pluies battantes et le vent entament progressivement les façades qui doivent être régulièrement ravalées. Lors des saisons pluvieuses, l'eau qui ruisselle dans le patio est collectée dans un puits : réserve d'eau précieuse.





Les exemples d'architecture enterrée sont très nombreux, dans le monde entier, et semblent appartenir à un âge révolu. On s'étonne aujourd'hui que l'on puisse à nouveau désirer vivre dans un habitat protégé par la terre. Les pratiques classiques de la construction s'opposent à cette idée alors que les possibilités technologiques actuelles, les normes et les conceptions modernes du confort y sont favorables. Ce n'est qu'aux époques d'abondance en énergie fossile, également dépassées, que l'homme a pu concevoir une architecture ignorante des environnements climatiques. La crise de l'énergie oblige a trouver des solutions efficaces au moindre coût. L'hyperisolation de la couverture épaisse de terre





MAISONS ENTERREES

La structure de la construction enterrée est indépendante et pour l'élever, toutes sortes de matériaux autres que la terre peuvent être employés. La terre ne participe pas directement à la structure; elle ne fait que la recouvrir. Les quartiers généraux de l'Unesco, à Paris, illustrent ce mode d'emploi de la terre rapportée.

Par contre, la terre peut jouer un rôle structural et constituer une partie du gros oeuvre des constructions enterrées. Nous relevons par exemple le procédé de "Terre armée" conçu par l'architecte Henri Vidal (2). Des lits d'armatures métalliques linéaires, placés dans des plans horizontaux, sont recouverts de couches de terre fortement compactées. Le massif de terre obtenu est cohérant sur toute sa hauteur et sur une profondeur égale à la longueur des armatures. Le parement est constitué d'une peau flexible ou d"écailles" de béton. Le procédé Vidal, éprouvé dans le domaine des travaux publics, a fait l'objet d'applications architecturales en divers pays (France, Espagne, USA). Des terrains pentus (jusqu'à 50 %) et peu accessibles sont désormais facilement constructibles.

MAISONS RECOUVERTES DE TERRE

L'habitat recouvert de terre est de conception très ancienne comme le confirme l'exemple des maisons circulaires du site chinois de Banpoo, construites il y a 4 000 ans. Le besoin de confort climatique, plus que la volonté de défense, fut à l'origine de telles habitations.

Ce vieux procédé d'isolation thermique est à nouveau d'actualité. Les conceptions les plus récentes d'architectures bioclimatiques y sont très favorables.

La terre isolante peut ne recouvrir que la toiture. Ce principe existe tout autant en climats chauds qu'en climats froids. Plusieurs types d'habitats africains (Tanzanie, Ethiopie, Haute-Volta, Niger) sont recouverts d'une épaisse couche de terre argileuse battue. En Islande et en Norvège,

que l'on tire sur une structure bâtie avec d'autres matériaux oppose une barrière à la froidure ou à la chaleur indésirables. Mais au-delà d'une réduction considérable de la consommation énergétique globale de l'habitat, c'est aussi une autre relation au paysage que revendiquent ces nouvelles architectures. Le temps des expériences et des prototypes fait désormais place au temps des nombreuses réalisations confirmant la popularité grandissante de l'habitat enterré. Régulièrement, des colloques internationaux (1) réunissent des chercheurs et des praticiens spécialisés et l'on constate que plusieurs universités et centres de recherche déploient une activité de très haut niveau sur le sujet.

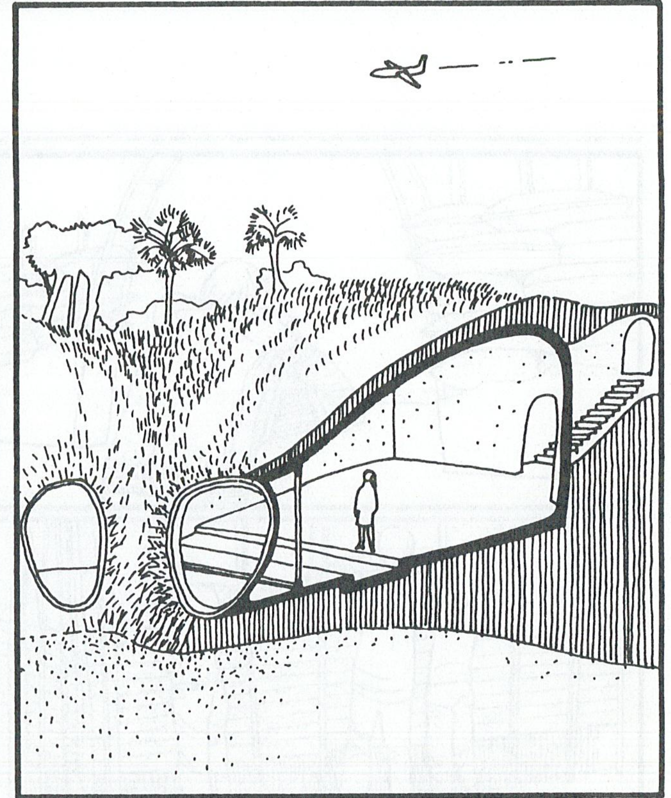
des demeures traditionnelles en bois conservent leurs toitures en mottes de gazon. Des recherches récentes menées au G.H.K. de Kassel, en R.F.A., tendent à donner davantage de crédit à cette solution d'isolation thermique par les toitures en terre (3). Une couche d'argile expansée recouverte de 40 cm de terre gazonnée assure une réduction de 50 à 90 % des pertes de chaleur par une toiture classiquement isolée. En outre, l'épaisseur de terre améliore considérablement l'isolation phonique de l'habitation.

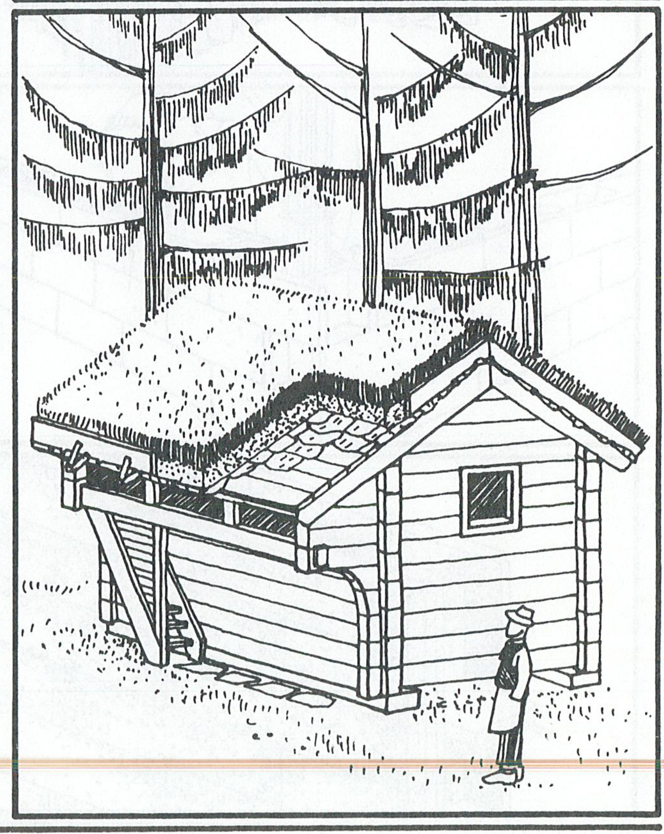
Les constructions enterrées ou couvertes de terre doivent être étanches à l'humidité.

L'humidité peut provenir de :
- l'absorption par la terre de l'eau de surface mal draîné
- pressions temporaires de l'eau exercées sur les murs
- la variation de hauteur de la nappe phréatique et de remontées capillaires
- la transmission de la vapeur d'eau au travers des parois

Le problème d'humidité peut être évité en prenant des dispositions de drainage, de protection et d'étanchéité appropriées. Les techniques et les produits sont multiples : peau filtrante et drains périphériques, pare-vapeur, enduits et peintures étanches, membranes de plastique armé, etc ...

Les constructions enterrées subissent les charges verticales de la terre couvrant la toiture et les poussées horizontales des terres contre les murs enterrés. Des pressions latérales temporaires dues à l'eau et au gel, des pressions ascendantes dues aux fluctuations de la nappe phréatique exercent des charges variables. Les murs massifs de soutènement, les murs cantilever, les maçonneries armées, la terre armée, les structures en coques, en voûtes, en dômes, sont quelques unes des solutions adoptées par les constructeurs de maisons enterrées.



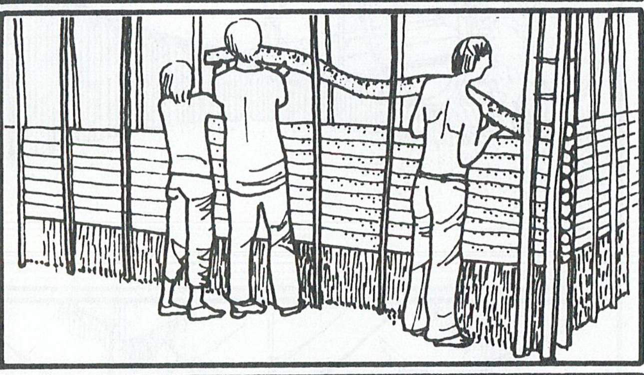


Employée à l'état sec, la terre peut remplir toutes sortes de matériaux creux manufacturés et participer à la structure des constructions. Pour des matériaux enveloppes légers et non stables d'eux-mêmes, le remplissage de terre leur donne du poids et assure leur stabilité. Lorsque les constructions en matériaux creux sont stables d'elles-mêmes, la masse de terre améliore leur isolation thermique et phonique. On connaît des exemples d'application de ces techniques pour la construction d'un habitat d'urgence destiné aux populations sinistrées. Permettant une économie de matériaux rares, d'exécution rapide et peu coûteuse, les réalisations connues relèvent le plus souvent d'un habitat temporaire.



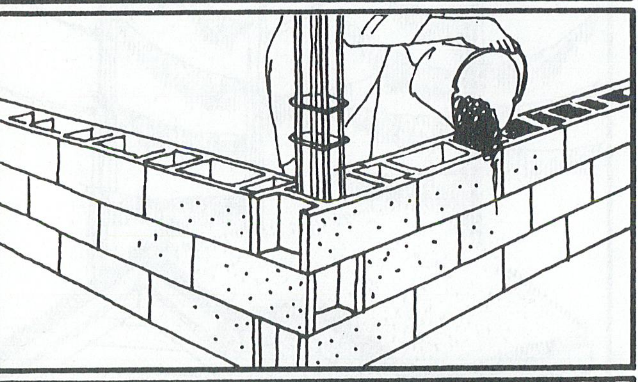
SACS

Des sacs en toile de jute sont remplis de terre sèche puis empilés. D'un rang à l'autre, les sacs sont décalés comme pour une maçonnerie appareillée Les ouvertures en forme d'arc sont renforcées par des barres d'acier ainsi que les murs en sacs par des fers posés horizontalement et verticalement.



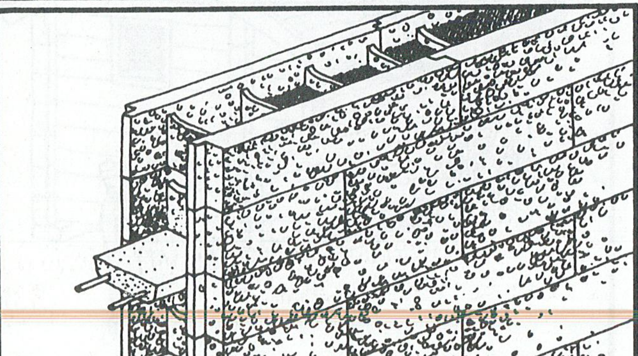
TUBES

Des boudins de coton remplis de sable volcanique sont trempés dans du lait de chaux puis superposés et tassés dans une armature rigide en bambou. Les deux faces des murs sont badigeonnés pour que la paroi respire. Un projet a été réalisé en 1978 au Guatemala. (1)



BLOCS

Des grands parpaings creux de ciment sont remplis de terre. Les éléments d'angles reçoivent les armatures et le béton (structure raidisseuse autocoffrée). Ce procédé a été testé lors de la construction en Algérie du village agricole d'Abadla, en 1975. (2)

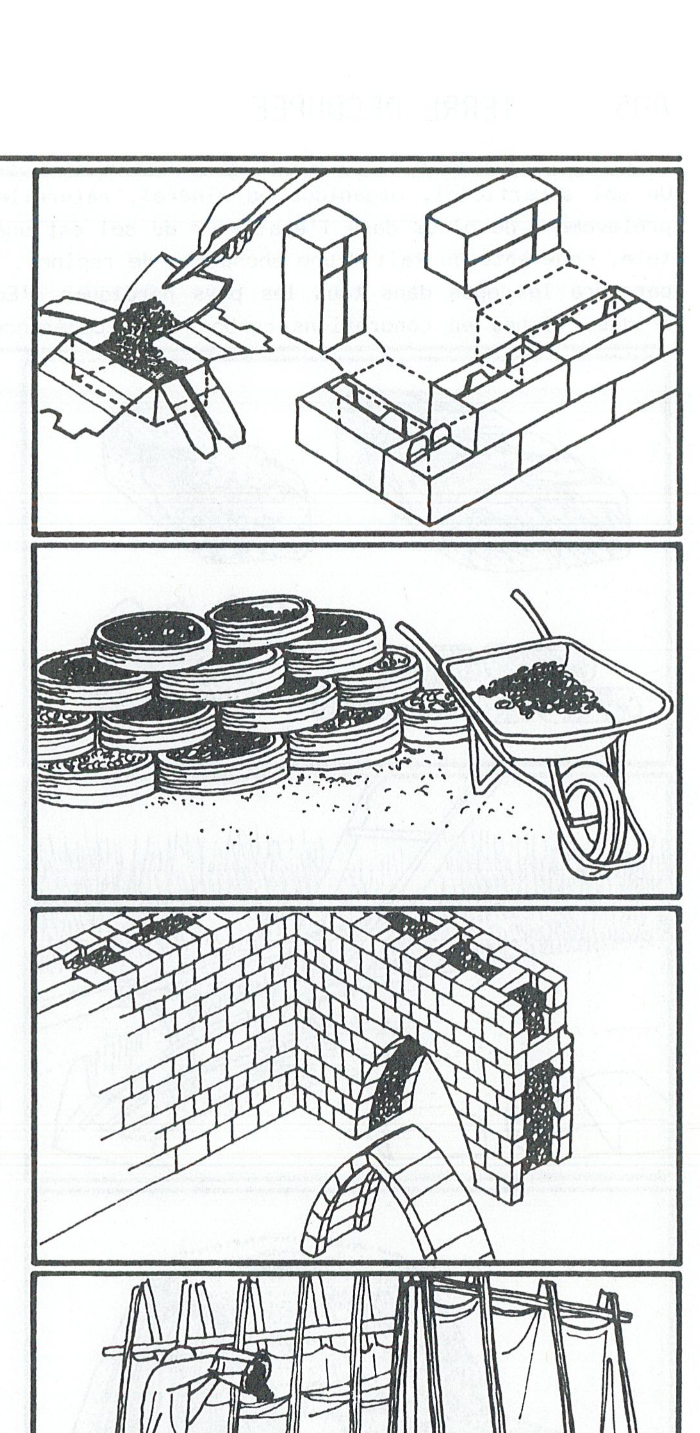


ELEMENTS ISOLANTS

La terre remplit des blocs alvéolaires en liège aggloméré. Ce système combine la masse et l'isolation thermiques. Des chaînages horizontaux et verticaux en béton armé coulé dans les alvéoles constituent la structure. Ce procédé encore expérimental a été inventé par le groupe Studie, en Corse (1981).

BOITES

En 1971, la Nasa a déposé un brevet de boîtes en carton parafiné pliées, destinées à être remplies de terre pour élever des murs. Le pliage astucieux compartimente la boîte en quatre alvéoles. Il laisse alors apparaître sur la face plate supérieure des pattes saillantes qui permettent un blocage des éléments.



RECIPIENTS, DECHETS

Des matériaux de récupération tels que fûts et bidons, etc, peuvent servir de matériaux de construction. Des pneus remplis de terre et empilés constituent des murs lourds isolants. Ces murs sont enduits de terre (extérieur) et de plâtre (intérieur). Des maisons autoconstruites ont été bâties sur ce principe.

MURS CREUX

La technique dite du "blocage" est très ancienne. Des murs en pierres ou en briques sont comblés de terre. De nombreux ouvrages romains, des cathédrales, la Muraille de Chine sont ainsi bâtis. La construction récente du village de Zeralda, en Algérie, adoptait cette technique.

TEXTILES

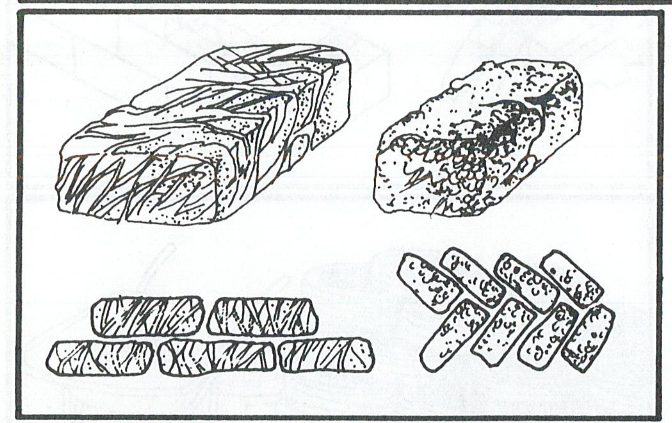
Des toiles suspendues à des portiques fichés dans le sol sont remplies de terre. Les éléments longs de 10 m sont fabriqués en série et rapidement montés. La paroi tendue présente un ventre en sa base et forme une structure très résistante aux séismes. Cette technique a été mise au point par le G.H.K. de Kassel (R.F.A.).

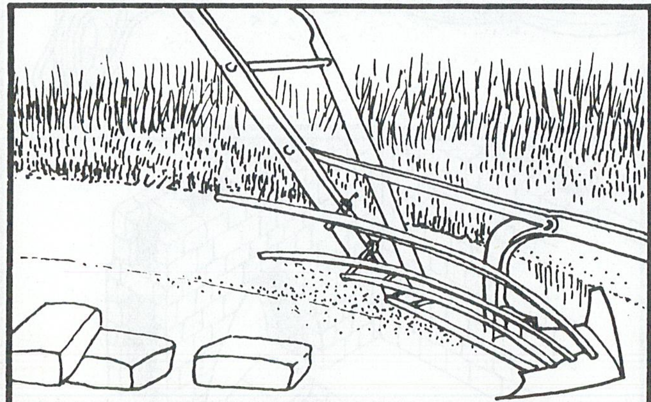
GRILLAGES

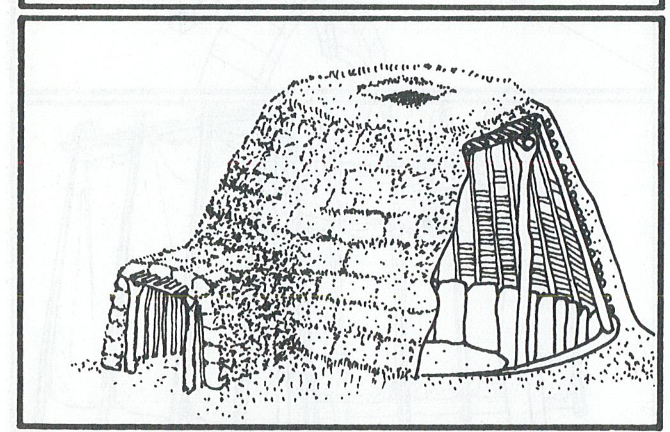


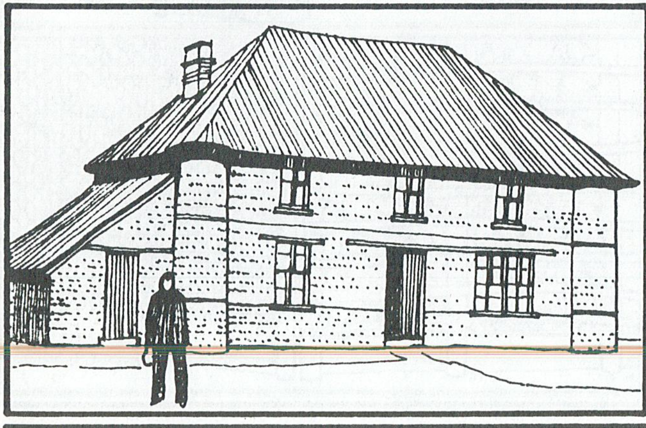
Des claies en bois ou une ossature de bois revêtue de grillage sont remplies de terre. Ce système allie la simplicité à la rapidité d'exécution mais doit être nécessairement protégé. Le grillage est un excellent support d'enduit. Cette technique a été employée sur l'Île de Mayotte (1982).

Un sol superficiel, organique ou minéral, naturellement cohérent, peut être directement découpé. Le prélèvement de blocs dans l'épaisseur du sol est une pratique très ancienne. La terre organique végétale, cohérente du fait d'une abondance de racines, était découpée en mottes de gazon. Cette technique parcoure les âges dans tous les pays nordiques d'Europe, d'Asie et d'Amérique. Les sols des régions arides, riches en concrétions carbonatées (cohérence chimique) sont aussi propices à cette technique.









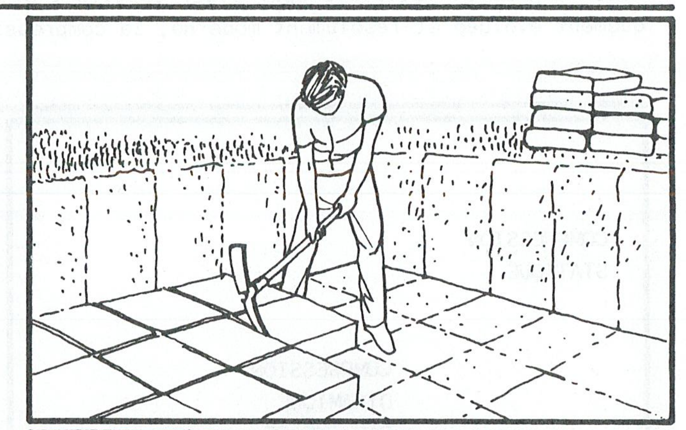
MOTTES DE TERRE

La construction en mottes de gazon ou en tourbe est connue sous plusieurs appellations : le "sod" (Angleterre, U.S.A.), le "turf" (Irlande) ou le "terrone" (Amérique centrale et latine). Si les mottes de gazon sont découpées dans la terre végétale humide, sur une seule couche, la tourbe est prélevée une fois sèche,en plusieurs couches selon l'épaisseur du gisement. L'exemple américain mérite attention. Les émigrants européens qui colonisèrent les Etats du Missouri et du Nebraska furent confrontés à un manque de pierres et de bois. L'argile abondait mais la rareté du combustible excluait la cuisson. Pour bâtir leurs fermes, les colons s'inspirèrent de l'habitat indien local (huttes rondes des tribus Omaha et Pawnee)et adoptèrent les mottes de gazon découpées. La découpe à la bêche ne donne pas facilement des mottes régulières. Aussi, l'extraction fut-elle améliorée par la mise au point d'une charrue adaptée, la "sauterelle", dotée d'une lame en équerre qui permettait de retirer délicatement des mottes de forme régulière, sans les briser. Les mottes sont bâties face gazonnée retournée, selon un appareil de briques classique. La construction en mottes pose le problème du tassement des murs et du bâtiment lui-même qui était rarement fondé. A force d'habitude, les bâtisseurs ménageaient des vides peu à peu comblés par le tassement, notamment au droit des linteaux des portes et fenêtres. Les premières maisons, de plan rectangulaire simple devinrent plus élaborées, décrivant des plans en L ou en T. Certaines prirent l'allure de véritables demeures bourgeoises, à étage. Ces maisons étaient particulièrement isolantes et résistantes à l'érosion. En outre, sur des terres encombrées d'herbe, le décapage du sol de surface permettait une préparation des terres cultivables. De nos jours, cette technique est peu utilisée. On remarque cependant que le "terrone" a été récemment homologué par les normes de la construction de l'Etat du Nouveau Mexique aux U.S.A. (1).

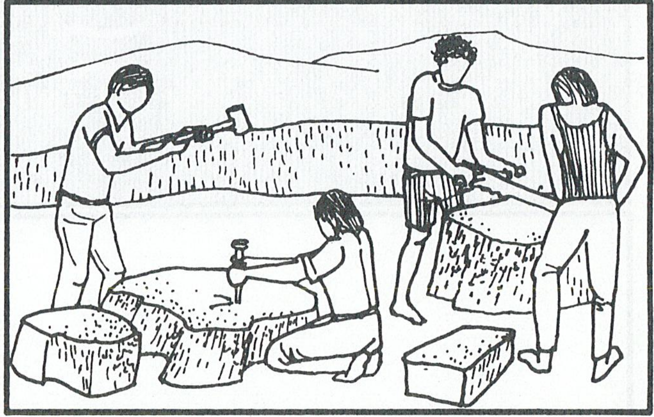
L'extraction des mottes et des blocs emploie un outillage simple (bêche, pioche, outils de carriers) et n'a évolué que très récemment. Les gestes de production sont réduits au minimum : pas de pulvérisation, de mélange, de compactage. Aussitôt découpés, les blocs ou les mottes sont utilisables. Ces techniques peu à peu délaissées pourraient obtenir un regain de faveur.

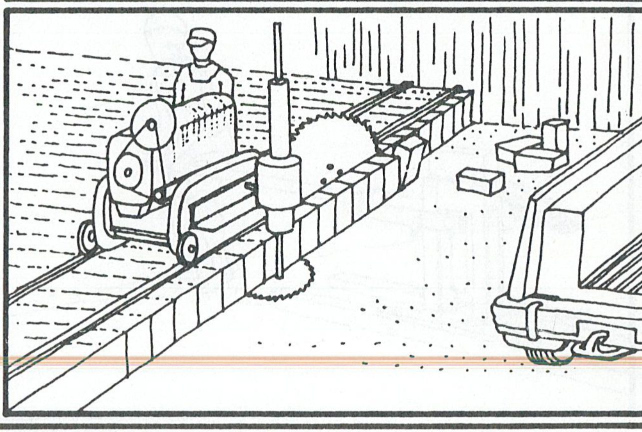
BLOCS DECOUPES

Certains sols présentent une cohérence et une dureté telles que l'on peut y découper des blocs et les employer pour la construction. Ce sont notamment les sols marqués par une forte teneur en éléments carbonatés ou résultant d'une induration latéritique. L'emploi des blocs de terre découpés est connu en de nombreux pays: les "tepetate", au Mexique, le "caliche", aux U.S.A., le "mergel", en Hollande, le "marl", en Angleterre, le "tuf", dans la plupart des pays méditerranéens. Ces sols résultant le plus souvent de la consolidation d'une roche-mère désagrégée. Une variété de latérite en induration, la plinthite (1),connue en Haute-Volta et en Lybie p.e., a la propriété de réagir au contact de l'air. Quoique friable et se désagrégeant dans l'eau lorsqu'ils sont extraits, les blocs de plinthite exposés quelques mois à l'air deviennent durs comme roche et résistants à l'eau. L'extraction traditionnelle des blocs découpés est similaire à celle de la pierre. Le travail manuel d'un homme aidé de pioches, de burins,de coins et de scies peut fournir cinquante gros blocs par jour. Vers les années 60 en Lybie, l'extraction des blocs de plinthite fut mécanisée avec l'emploi de scies rotatives poussées ou autotractées. Fragile à l'eau, le matériau ne peut être taillé par des scies diamentées. Des scies spéciales furent utilisées, à pastilles de carbure de tungstène, très résistantes à l'abrasion et aux chocs sur des parties de matériau déjà indurées. Munies de guides, ces scies permettent un découpage rectiligne du matériau, en quadrillage; la production est considérablement élevée. Récemment au Mexique,on reparlait de l'emploi du "tepetate" pour la construction d'écoles (programme CONESCAL) (2). L'Etat du Texas envisage à nouveau l'exploitation du caliche (3). Ces matériaux sont dotés de propriétés de solidité et de dureté appréciables pour que leur remploi suscite un regain d'intérêt. Un matériel d'extraction adapté doit être mis au point.

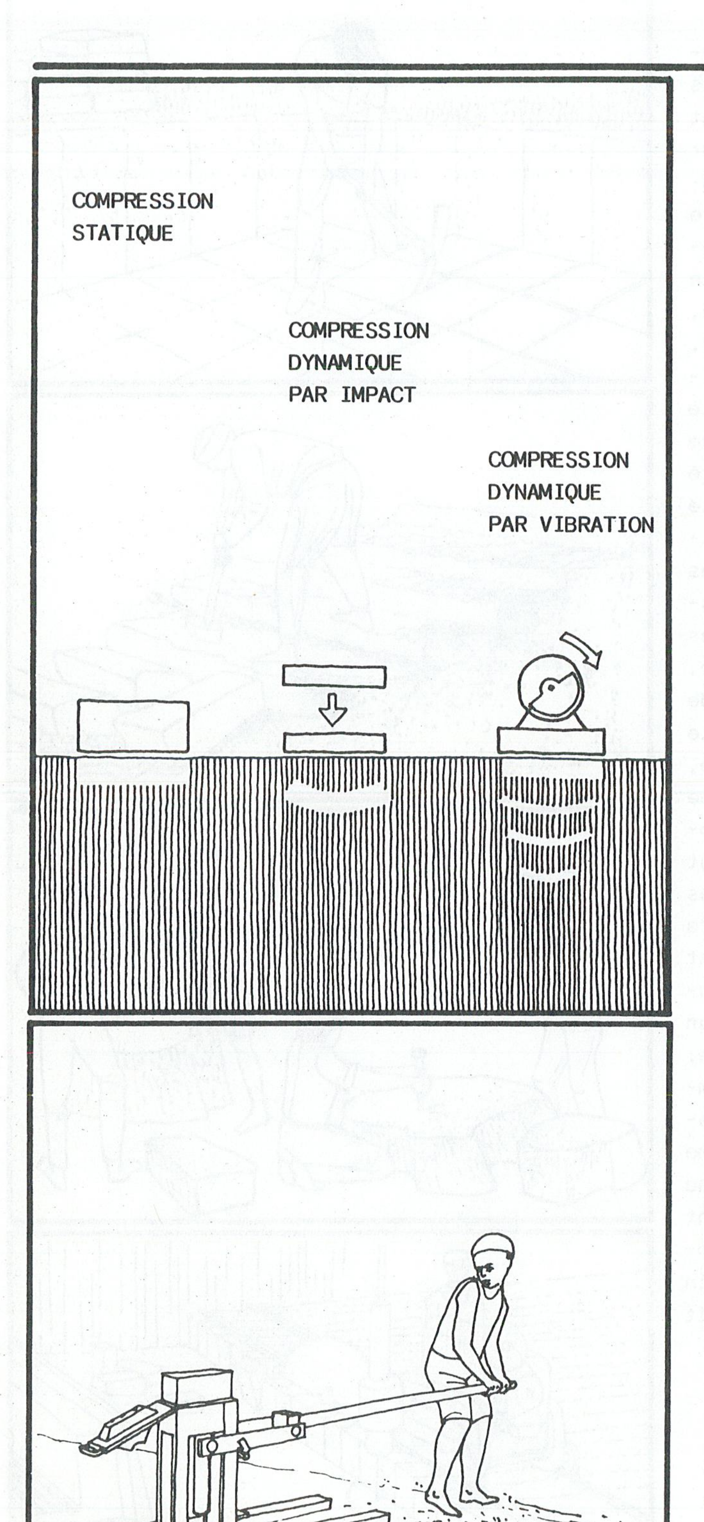








Naturellement perméable et poreuse, la terre est très sensible à l'eau. En pénétrant les vides du matériau, l'eau engage des dégradations irréversibles. La réduction du volume des vides du matériau diminue sa sensibilité à l'eau et augmente sa résistance. Cette amélioration s'obtient en comprimant la terre, élevant ainsi sa densité. De nos jours, c'est la technologie de la terre comprimée qui est la mieux connue et maîtrisée pour avoir captivé l'attention des techniciens et des scientifiques. Techniquement évoluée et résolument moderne, la compression est très prisée et semble dotée d'un bel avenir.



LES MECANISMES DE COMPRESSION

Compression statique : Sur le sol, un poids mort exerce une pression statique; l'action en profondeur est limitée à cause de la friction interne du sol.

Compression dynamique : impact ou vibration.

Un objet tombe sur le sol. L'impact produit une onde de choc et de pression qui met les particules en mouvement. L'action en profondeur est meilleure. La force d'impact d'un poids chutant d'une hauteur de 50 cm est 50 fois supérieure à sa pression statique.

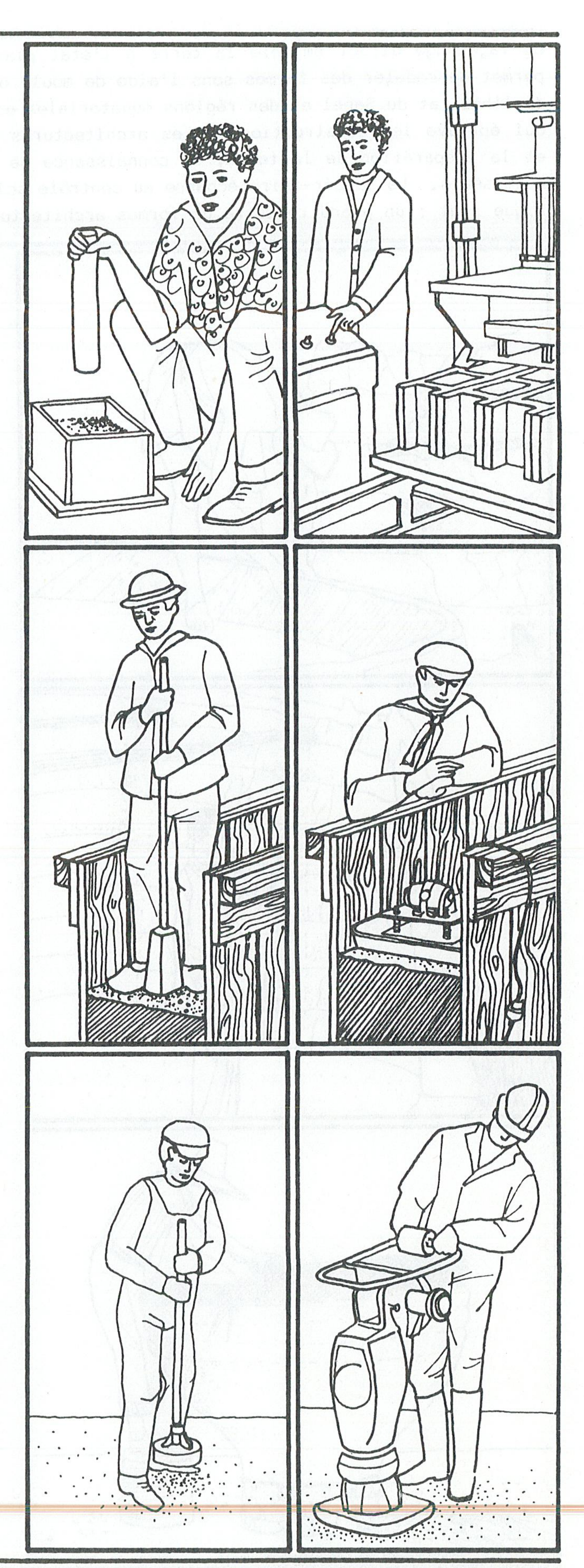
Les engins vibrants exercent une série d'impacts rapides sur le sol à la fréquence de 500 à 5 000 vibrations par minute. Les ondes de pression pénètrent en profondeur. Le mouvement imprimé aux particules élimine temporairement la friction interne et réorganise les grains. On obtient une densité maximale. La compression par vibration est rapide et emploie un matériel moins lourd mais plus sophistiqué que la compression statique.

COMPRESSION STATIQUE

Dans la pratique, la compression statique d'une masse de terre se traduit par l'application d'une force. Celle-ci est exercée au moyen d'une presse mécanique ou hydraulique. Retenue dans un moule, la terre est comprimée entre deux plateaux qui se rapprochent lentement. La compression expulse l'air. Les densités obtenues sont de 1700 à 2300 kg/m³. Les presses statiques ne conviennent que pour la production de petits éléments (briques, hourdis, etc) et ne sont pas adaptées pour la fabrication de murs ou de pavements monolithiques. Selon le type de presse employée, la production est de 300 à 20 000 briques par jour. Le coût de ces unités varie de 200 US$ à 1 000 000 US$.

COMPRESSION DYNAMIQUE PAR IMPACT

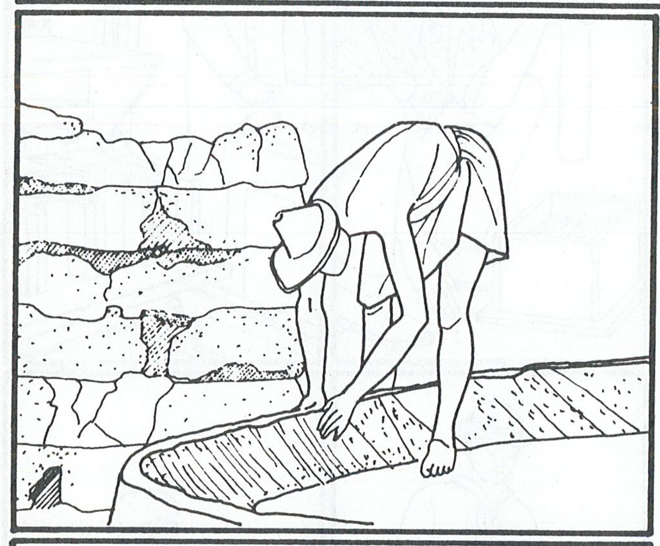
La fabrication manuelle de briques en comprimant la terre dans des moules en bois ou en acier à l'aide de pilons est une technique ancienne. Le travail est fastidieux et les rendements restent faibles. La régularité d'épaisseur des blocs est difficile à contrôler. Plusieurs tentatives de mécanisation ont été faites avec des presses à couvercle lourd, rabattable, très pénibles à manipuler. Des presses motorisées furent employées. Elles ont aujourd'hui disparu du marché car leur lenteur de fonctionnement et le contrôle de la régularité d'épaisseur et de densité des blocs restaient problématiques. La compression dynamique par impact est par contre tout à fait adaptée à la fabrication de murs en terre comprimée monolithiques. Universellement connu, le PISE consiste en un damage de la terre entre des coffrages. Le matériau obtenu est très solide et durable tel que peut en témoigner un patrimoine architectural mondial aussi riche que varié et d'une qualité souvent étonnante. Une technique similaire fut et demeure employée pour la mise en oeuvre de pavements en terre battue.

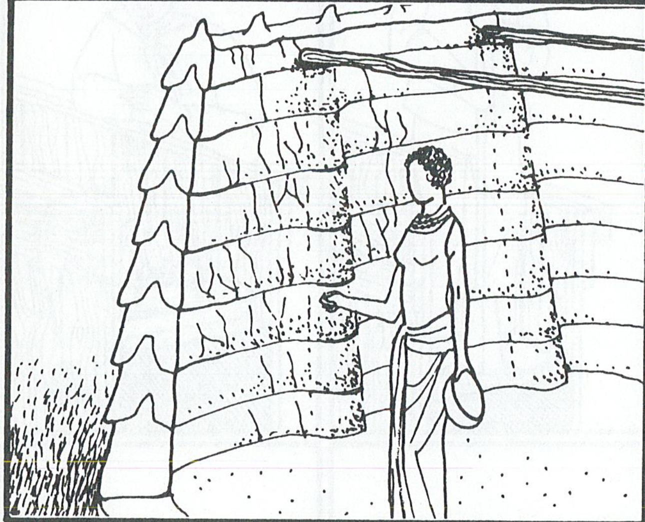


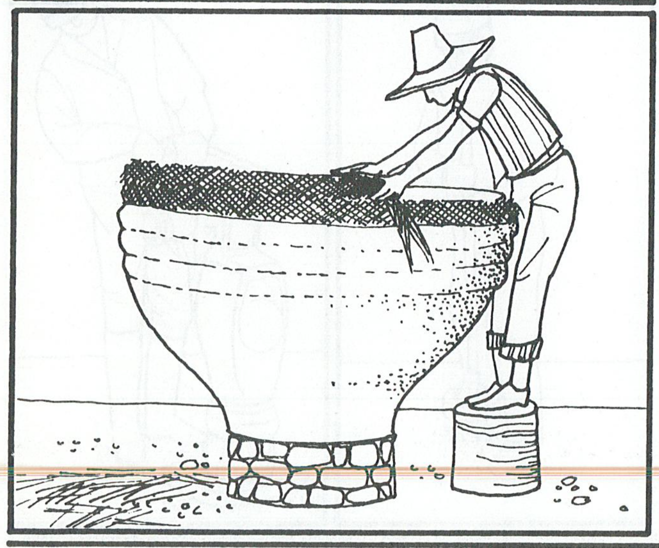
COMPRESSION DYNAMIQUE PAR VIBRATION

L'élévation de la densité des sols par vibration est largement employée pour les travaux routiers. Cette technique est également utilisée pour la fabrication de blocs de terre comprimée; dès 1954 p.e., des unités de production sont opérationnelles au Burundi et au Soudan. La compression par vibration permet de fabriquer des blocs de grande dimension (50 cm x 20 cm x 20 cm, p.e.) qui exigent une énergie plus importante en compression statique. On peut aussi fabriquer des blocs alvéolaires. Les unités de production sont jusqu'à présent très lourdes et encombrantes. Le principe a été adapté au pisé par le G.H.K. de Kassel (RFA) un petit vibrateur à charge rotative excentrée, alimenté par électricité circule dans le coffrage. Les aller-retour de l'engin sont commandés par interrupteur. Le système réduit considérablement la main d'oeuvre. Ce matériel a été utilisé pour la construction d'une maison au Brésil (1982). La compression par vibration convient particulièrement pour la réalisation de sols; la gamme d'engins du marché est aujourd'hui très large.

Le façonnage direct emploie la terre à l'état plastique, facteur essentiel de sa mise en oeuvre, et permet de modeler des formes sans l'aide de moule ou de coffrage. En Afrique Noire, une grande partie de l'habitat du Sahel et des régions équatoriales est ainsi bâti malgré la violence de la saison humide qui éprouve les constructions. Les architectures sont d'une beauté souvent surprenante. La qualité et la préparation de la terre, la connaissance de la consistance appropriée, sont seules connues des bâtisseurs. Le savoir-faire échappe au contrôle scientifique. Les principaux avantages de cette technique sont : un grand registre de formes architecturales, la mobilisation d'une main d'oeuvre réduite.







COLOMBIN

La terre qui sera directement façonnée à la main est souvent travaillée à l'avance. Cette préparation passe par des phases successives d'hydratation, de pétrissage et de séchage jusqu'à obtenir la consistance plastique idéale. Le matériau est parfois amélioré par l'ajout de substances végétales ou animales, de déchets organiques. La terre est ensuite façonnée en boudins accolés en oblique puis lissés, ou bâtie au colombin, le geste du bâtisseur égalant celui du potier. Les parois réalisées n'ont que 5 à 7 cm d'épaisseur, à peine plus en leur base. Conçues selon cette technique, les fameuses cases-obus des Mousgoum (Nord Cameroun) étonnent encore par leur architecture tout à fait originale.

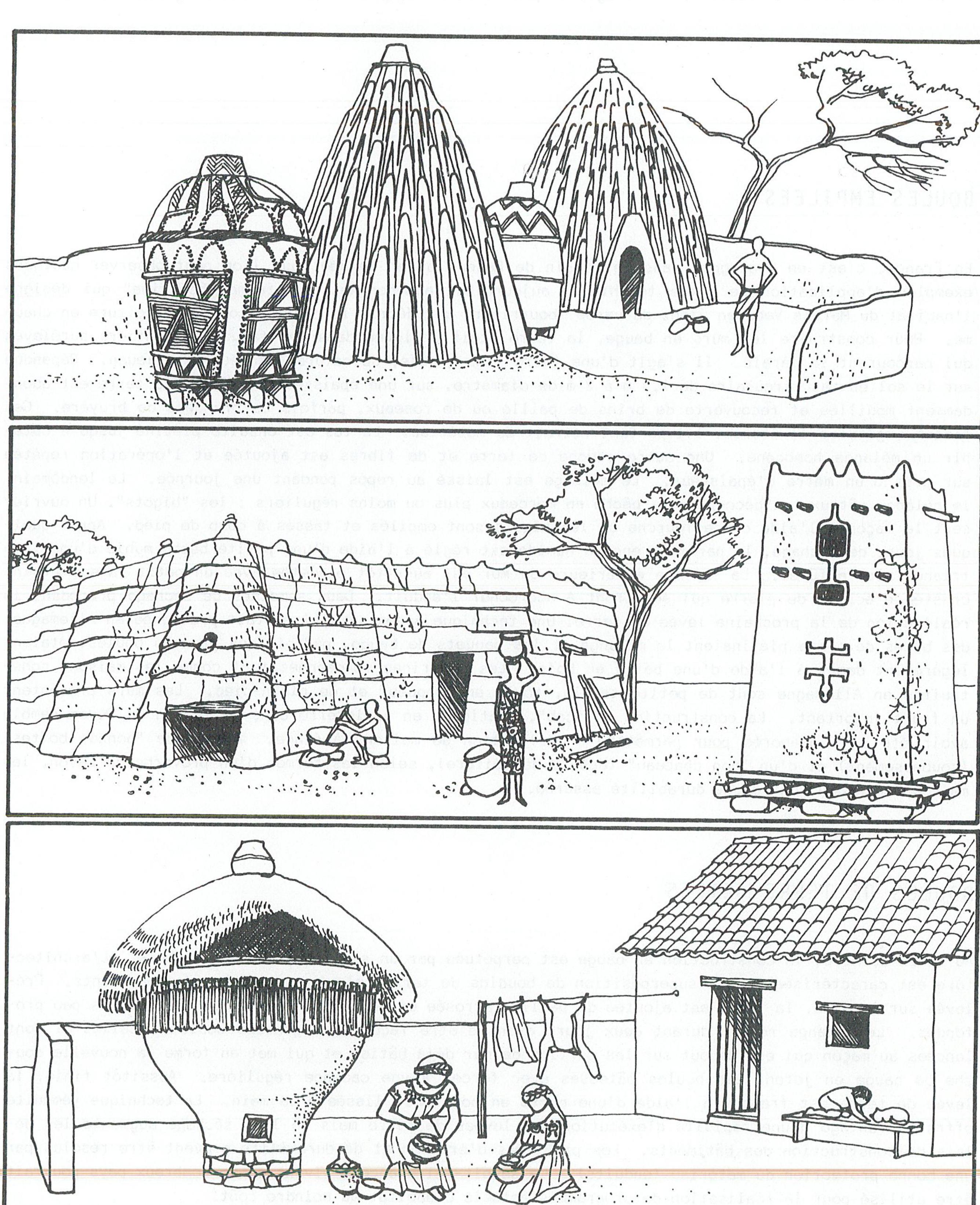
BOULES FACONNEES

Des boules de terre de gros diamètre permettent d'élever des murs plus épais. Le matériau est bâti en plusieurs assises, la main restant l'outil essentiel. Chaque couche doit sécher avant que l'on dresse la suivante. Pour une meilleure stabilité du matériau, les couches successives se chevauchent et s'emboîtent en forme de bourrelets débordants. Les parois restent peu porteuses. Des surépaisseurs sont prévues pour soutenir la charge des lourdes toitures de rondins et de paille recouvertes d'argile pétrie. Les fermes lobi du Nord Ghana et les maisons-forteresses des Samba du Nord Benin illustrent cette technique.

TRESSES FACONNEES

La préparation du matériau et sa mise en oeuvre sont d'une grande variété. La terre peut être abondamment ajoutée de fibres végétales, le plus souvent de la paille. Des petites gerbes de longs brins de paille torsadés sont enduites de boue argileuse plastique. Des parois minces (5 cm) sont bâties en façonnant de véritables tresses de terre. Cette technique, observable au Mexique, est employée pour construire des greniers dont la forme ventrue évoque celle des poteries. Ces ouvrages sont d'une durabilité surprenante.

l'économie des constructions, l'emploi d'outils élémentaires, un bon accrochage des enduits (piquetage du support ou incrustation d'éclats de matériaux durs). Par contre, le séchage et le contrôle des fissurations de retrait, les faibles performances mécaniques du matériau, sont problématiques. Au-delà d'une bonne connaissance des architectures, le façonnage direct n'a fait l'objet à ce jour d'aucune étude systématique qui permettrait sans doute une amélioration de ses qualités et une réduction de ses inconvénients.



Abandonnée en Europe, où elle est connue sous le terme de "bauge" (en France) ou de "cob" (en Grande-Bretagne), la construction en terre empilée est encore d'actualité dans la plupart des Pays en Développement. L'architecture en bauge est aussi modeste que spectaculaire : de simples habitations rurales (Afghanistan) ou des villes aux immeubles altiers de plusieurs étages (Yémen). La terre argileuse est employée à l'état de pâte cohérente, plutôt molle, et ajoutée d'un dégraissant qui améliore sa cohésion et sa résistance à la traction. Il s'agit le plus souvent de paille ou de balle de grains mais certai-

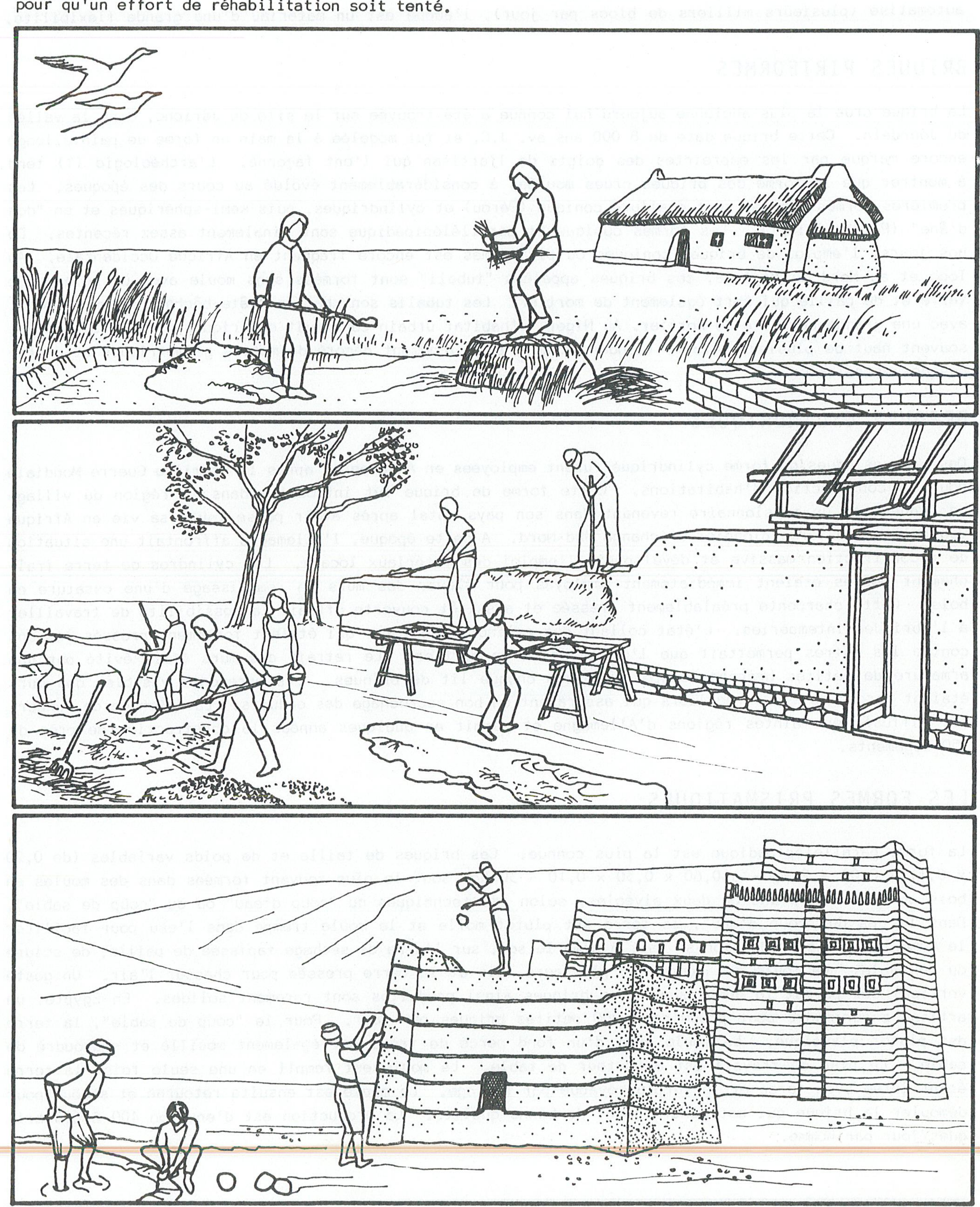
BOULES EMPILEES

En France, c'est en Bretagne, dans le Bassin de Rennes et en Vendée, que l'on peut observer quelques exemples d'application de cette technique, aujourd'hui abandonnée. Le terme "bourrine" qui désigne l'habitat du Marais Vendéen vient du verbe "bourriner" qui décrit la réalisation de la toiture en chaume. Pour construire les murs en bauge, la terre était prélevée dans les talus des sentiers surélevés qui parcourent le marais. Il s'agit d'une terre très grasse, de nature limoneuse-argileuse. Répandue sur le sol en tas circulaire de 1,5 m à 2 m de diamètre, sur une épaisseur de 10 cm, la terre est abondamment mouillée et recouverte de brins de paille ou de roseaux, parfois de branches de bruyère. Ces fibres végétales limiteront l'important retrait du matériau. Le tas est ensuite piétiné jusqu'à obtenir un mélange homogène. Une autre couche de terre et de fibres est ajoutée et l'opération répétée sur près d'un mètre d'épaisseur. Le mélange est laissé au repos pendant une journée. Le lendemain, le mélange pâteux est découpé à la bêche en morceaux plus ou moins réguliers : les "bigots". Un ouvrier sert le maçon à l'aide d'une fourche et les bigots sont empilés et tassés à coup de pied. Après quelques jours de séchage, le parement encore humide est réglé à l'aide d'une petite bêche munie d'une lame triangulaire affûtée. La surface extérieure du mur est aussitôt piquetée avec un petit rateau et incrustée d'éclats de pierre qui serviront à accrocher l'enduit. Deux semaines de séchage précèdent la réalisation de la prochaine levée de terre. Une technique assez similaire était pratiquée en Allemagne; des bêtes de somme piétinaient le mélange et les paquets de bauge, parfois des grosses boules, étaient légèrement damés à l'aide d'une batte en bois. Les bourrines vendéennes tout comme les maisons construites en Allemagne sont de petite taille, toute en longueur et de plain-pied. Les murs présentent un fruit important. La construction en "cob", pratiquée en Angleterre dans la région du Devon semble avoir été plus élaborée pour permettre l'édification de maisons à étage. Munies de "bonnes bottes" (soubassement) et d'un "bon chapeau" (débord de toiture), selon les termes d'un proverbe du Devon, les maisons en bauge sont d'une durabilité assurée.

BOULES DE TERRE JETEES

Au Yémen du Nord, la construction en bauge est perpétuée par un savoir-faire très élaboré. L'architecture est caractérisée par la superposition de boudins de terre relevés aux angles des bâtiments. Prélevée sur le site, la terre est ajoutée de paille, arrosée et foulée aux pieds dans des fosses peu profondes. Le mélange repose durant deux jours avant d'être façonné en grosses boules. Celles-ci sont lancées au maçon qui est debout sur les parties de mur déjà bâties et qui met en forme la nouvelle couche de bauge en jetant les boules pâteuses avec force, à une cadence régulière. Aussitôt finie, la levée de terre est frappée à l'aide d'une batte en bois puis lissée à la main. La technique yéménite offre l'avantage d'une rapidité d'exécution des levées de terre mais le long séchage augmente les délais de construction des bâtiments. Les problèmes d'érosion et de durabilité peuvent être résolus par une bonne protection du matériau (enduits). Ce savoir-faire encore vivant en de nombreux pays pourrait être utilisé pour la réalisation de programmes actuels d'habitat au moindre coût.

nes terres sont parfois très graveleuses, approchant celles employées pour le pisé. Pétri par avance, le matériau est façonné en grosses boules empilées ou jetées avec force. Les murs sont ainsi bâtis en plusieurs couches et sont très épais (40-50 cm jusqu'à 200 cm), d'aspect monolithique. Les techniques de construction en bauge, multiples, sont assez mal connues. Le problème de fissuration du matériau au séchage, qui peut être évité, polarise l'attention des techniciens qui craignent de réemployer cette technique. Les qualités et les potentialités de la bauge sont pourtant suffisamment manifestes pour qu'un effort de réhabilitation soit tenté.



La brique de terre crue séchée au soleil est sans doute l'un des plus anciens matériaux de l'habitation humaine. Ce matériau est le plus souvent désigné par le mot espagnol "adobe" dont l'origine doit être recherchée dans le terme arabe "ottob" et jusqu'en Egypte où la brique crue est appelée "thobe". Les adobes sont fabriqués avec une boue épaisse et maléable, souvent ajoutée de paille, puis formées à la main, dans des moules ou à l'aide de machines; les formes sont multiples. Par la grande diversité de modes de production, qui va de l'artisanal (100 à 150 briques/homme/jour) à l'industriel totalement automatisé (plusieurs milliers de blocs par jour), l'adobe est un matériau d'une grande flexibilité.

BRIQUES PIRIFORMES

La brique crue la plus ancienne aujourd'hui connue a été trouvée sur le site de Jericho, dans la vallée du Jourdain. Cette brique date de 8 000 ans av. J.C. et fut modelée à la main en forme de pain allongé encore marqué par les empreintes des doigts de l'artisan qui l'ont façonné. L'archéologie (1) tend à montrer que la forme des briques crues moulées a considérablement évolué au cours des époques. Les premières formes connues sont d'allure conique (Pérou) et cylindriques, puis semi-sphériques et en "dos d'âne" (Proche-Orient). Les formes cubique et parallélépipédique sont finalement assez récentes. De nos jours, l'emploi de briques coniques ou piriformes est encore fréquent en Afrique Occidentale. Au Togo et au Nord du Nigéria, ces briques appelées "tubali" sont formées sans moule avec un mélange de terre et de paille qui sert également de mortier. Les tubalis sont bâties "tête-bêche", en murs épais, avec une grande quantité de mortier. Au Niger, l'habitat urbain construit en briques moulées à la main, souvent haut de plusieurs étages (Zinder, Kano), est richement décoré de motifs géométriques et d'arabesques entrelacées.

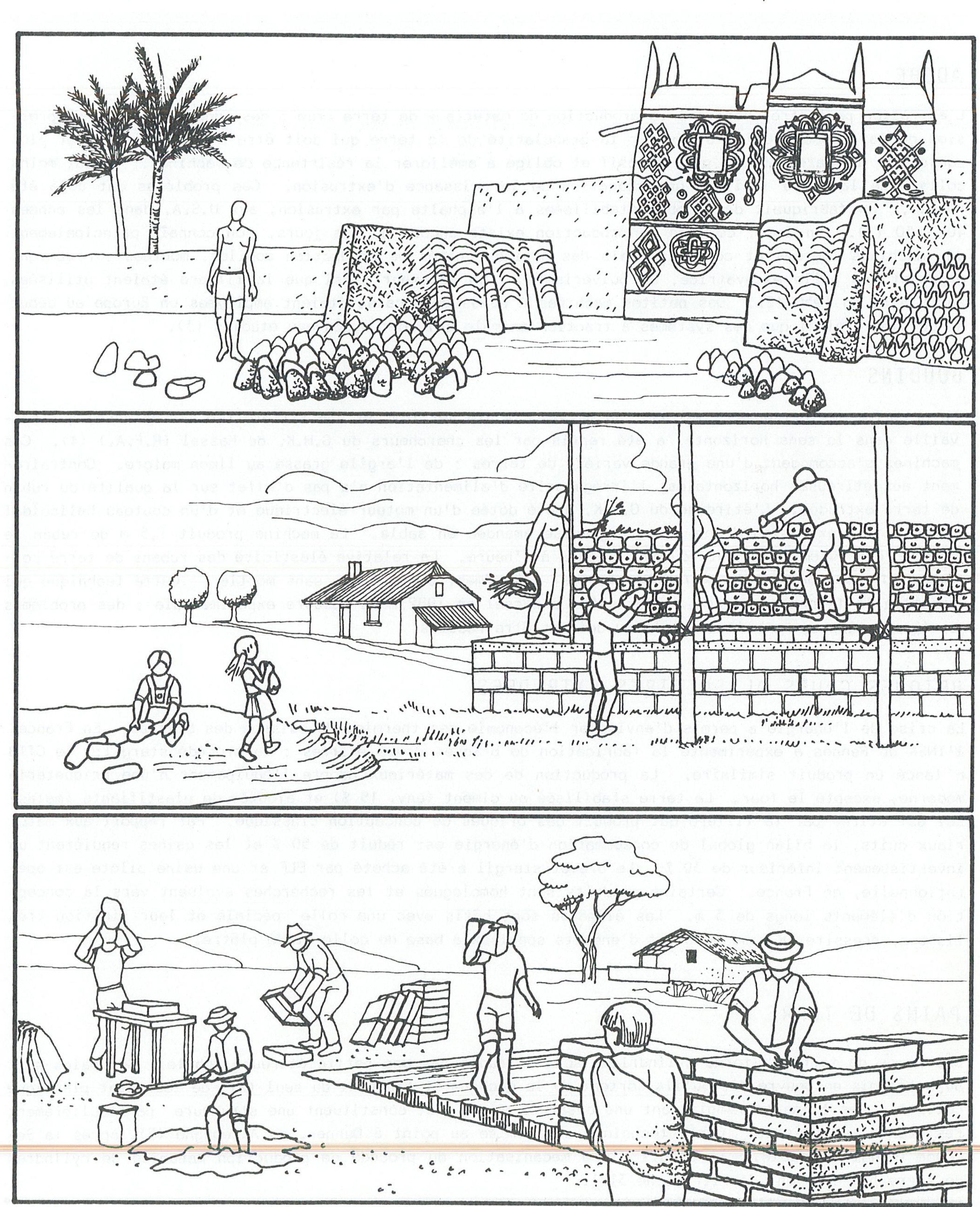
BRIQUES CYLINDRIQUES

Des briques crues de forme cylindrique furent employées en Allemagne, après la Première Guerre Mondiale pour la construction d'habitations. Cette forme de brique fut introduite dans la région du village de Dünner par un missionnaire revenant dans son pays natal après avoir passé toute sa vie en Afrique Centrale : une forme pionnier d'échange Sud-Nord. A cette époque, l'Allemagne affrontait une situation de reconstruction massive et développait l'emploi des matériaux locaux. Les cylindres de terre fraîchement moulés étaient immédiatement employés pour élever des murs en remplissage d'une ossature en bois. Cette charpente préalablement dressée et aussitôt couverte offrait la possibilité de travailler à l'abri des intempéries. L'état collant des cylindres de terre qui étaient fortement pressés les uns contre les autres permettait que l'on se passe de mortier. Le retrait des murs était évité par une armature de petites branches disposées entre chaque lit de briques. Les parements visibles des murs étaient percés de trous réguliers qui assuraient un bon accrochage des enduits. La "méthode de Dünner" fut diffusée en maintes régions d'Allemagne et permit en quelques années la construction de près de 350 logements.

LES FORMES PRISMATIQUES

La forme parallélépipédique est la plus connue. Ces briques de taille et de poids variables (de 0,20 x 0,11 x 0,05 - 2 kg - à 0,60 x 0,30 x 0,10 - 30 kg) sont le plus souvent formées dans des moules en bois ou en acier à une ou deux alvéoles, selon les techniques du "coup d'eau" ou du "coup de sable". Dans le cas du "coup d'eau", la terre est plutôt molle et le moule trempé dans l'eau pour faciliter le démoulage. La production se fait à même le sol, sur l'aire de séchage tapissée de paille, de sciure ou de sable. Le moule est rempli en plusieurs fois et la terre pressée pour chasser l'air. Un geste vertical sec permet le démoulage. Les briques ainsi produites sont rarement solides. En Egypte, un artisan expérimenté peut produire 2 000 petites briques par jour. Pour le "coup de sable", la terre est plutôt plastique. Le moule muni d'un fond percé de trous est également mouillé et saupoudré de sable. Le plan de travail est à hauteur de table. Le moule est rempli en une seule fois, la terre étant jetée avec force et le surplus évacué par raclage. Le moule est ensuite retourné et secoué pour démouler la brique qui est généralement de bonne qualité. La production est d'environ 400 à 600 briques/jour par homme.

adapté au plus large registre de contextes socio-économiques. La construction en adobe est encore très pratiquée dans la plupart des p.e.d. mais y symbolise la pauvreté. Dans les pays industrialisés, depuis ces dix dernières années, l'adobe connaît un regain de popularité. Dans le Sud-Ouest des U.S.A., des colloques internationaux réunissent chercheurs et praticiens; l'adobe a fait l'objet de codes de construction officiels. La brique crue ne semble pas être appelée à des évolutions extraordinaires mais restera sans doute l'un des matériaux dominants de la construction en terre des prochaines années.



Le procédé de terre extrudée a été adopté par l'industrie briquetière depuis fort longtemps. La littérature technique consigne l'existence de nombreuses machines couramment employées au siècle dernier dans la plupart des pays dotés d'une tradition de la brique. Le principe est demeuré inchangé, seules les machines ont connu quelques améliorations. La terre utilisée est très argileuse, débarassée de ces gros granulats et travaillée à l'état de pâte semi-ferme. Introduit dans la machine, le matériau

ADOBE

L'extrusion peut être adaptée à la production de matériaux de terre crue : des adobes, p.e. La suppression de la cuisson oblige à réviser la granularité de la terre qui doit être moins argileuse et plus sableuse. Le matériau est plus abrasif et oblige à améliorer la résistance de machines. L'état moins collant de la terre implique une réduction de la puissance d'extrusion. Ces problèmes ont déjà été résolu. On fabriquait des adobes stabilisées à l'asphalte par extrusion, aux U.S.A. dans les années 40 - 50 (1). En Inde, ce type de production existe encore de nos jours. On connaît principalement des machines lourdes et coûteuses mais des petites unités de production mobiles, montées sur camion, groupant une pelle excavatrice, un pulvérisateur, un malaxeur ainsi que la filière étaient utilisées aux U.S.A. en 1950 (2). Des petites machines à cuves verticales étaient employées en Europe au début de ce siècle ainsi que des systèmes à traction animale qui sont à nouveau étudiés (3).

BOUDINS

Le principe des étireuses combinant un malaxeur à axe vertical et une filière (en bas de cuve) qui travaille dans le sens horizontal a été repris par les chercheurs du G.H.K. de Kassel (R.F.A.) (4). Ces machines s'accomodent d'une grande variété de terres : de l'argile grasse au limon maigre. Contrairement aux étireuses horizontales, l'irrégularité d'alimentation n'a pas d'effet sur la qualité du ruban de terre extrudée. L'étireuse du G.H.K. a été dotée d'un moteur électrique et d'un couteau hélicoïdal permettant l'extrusion d'une terre argileuse amandée en sable. La machine produit 1,5 m de ruban de section 8 x 16 cm par minute ou 360 briques à l'heure. La relative élasticité des rubans de terre permet de dresser des murs aux formes souples, des dômes, des voûtes, sans mortier. Cette technique qui rappelle le façonnage direct a été testée à Kassel en 1982 mais demeure expérimentale : des problèmes de fissuration de retrait du matériau doivent être résolus.

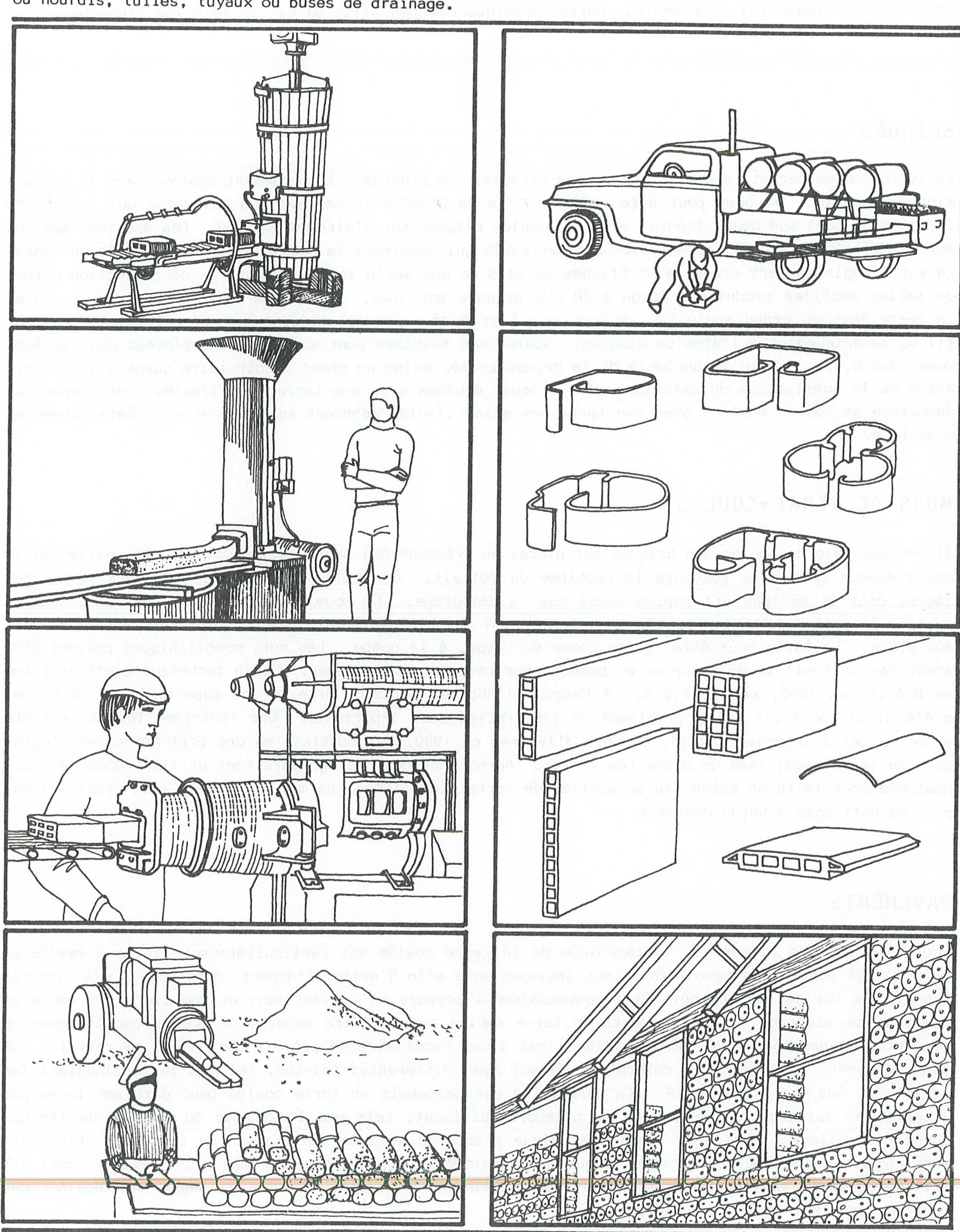
BRIQUES CRUES ALVEOLAIRES EXTRUDEES

La crise de l'énergie a permis d'envisager l'économie des thermies de cuisson des briques. En France, l'INSA de Rennes a expérimenté la fabrication de briques crues étirées : le procédé stargil; le CTTB a lancé un produit similaire. La production de ces matériaux adopte l'équipement d'une briqueterie moderne, excepté le four. La terre stabilisée au ciment (env. 15 %) et ajoutée de plastifiants (mélasse) est étirée par la filière qui produit des briques de conception classique. Par rapport aux matériaux cuits, le bilan global de consommation d'énergie est réduit de 50 % et les usines requièrent un investissement inférieur de 30 %. Le brevet stargil a été acheté par ELF et une usine pilote est opérationnelle, en France. Certains produits sont homologués et les recherches évoluent vers la conception d'éléments longs de 3 m. Les éléments sont bâtis avec une colle spéciale et leur finition très lisse a nécessité la mise au point d'enduits spéciaux à base de colle et de plâtre.

PAINS DE TERRE

Des pains de terre de forme cylindrique sont extrudés par une petite étireuse mobile. Ces pains sont aussitôt mis en oeuvre dès qu'ils sortent de la machine et tiennent du seul fait de leur état plastique collant. Les éléments remplissent une ossature en bois et constituent une structure particulièrement résistante aux séismes. Cette technique a été mise au point à Dünner, en Allemagne (5), après la Seconde Guerre Mondiale. Il s'agit d'une mécanisation du procédé de production manuelle de cylindres de terre précédemment décrit (fiche 318).

est extrudé au travers de filières spécialement aménagées et sort sous forme de boudin de terre continu. Réceptionné sur une table ou un tapis roulant, le boudin pâteux est aussitôt découpé par des fils de fer en matériaux réguliers. Cette technique efficace encore retenue par l'industrie céramique offre l'avantage de permettre la production d'éléments très divers : briques pleines ou creuses, carreaux ou hourdis, tuiles, tuyaux ou buses de drainage.



811 TERRE COULEE

La terre à l'état de boue liquide et de granularité assez sableuse, voire graveleuse peut être employée à l'égal d'un béton maigre. La terre coulée présente plusieurs avantages tels qu'une préparation aisée du matériau requérant un minimum d'énergie, une grande facilité de mise en oeuvre et un très large registre d'applications pouvant aller de la préfabrication d'éléments à la construction de murs monolithiques ou de pavements. Néanmoins, cette technique est peu utilisée car le matériau présente un im-

BRIQUES

La terre coulée permet la préfabrication de briques. Ce procédé est couramment employé dans la production artisanale. La boue peut être préparée dans de grandes fosses avec un bulldozer qui transporte le matériau dans son godet frontal vers les moules alignés sur l'aire de moulage. Des machines mobiles munies de trémies hydrauliques actionnées par cable qui déversent la boue dans un moule également adapté sur l'engin peuvent produire 25 briques ou plus en une seule fois. Des unités de production dotées de telles machines produisent jusqu'à 20 000 briques par jour. Une autre méthode consiste à couler la terre dans un grand moule (3 m x 3 m, p.e.) et à découper les briques par la suite à l'aide d'un fil ou mécaniquement à l'aide de disques. Toutes ces méthodes sont aujourd'hui employées dans le Sud-Ouest des U.S.A. Cette technologie de la brique coulée exige un grand savoir-faire quant à l'appréciation de la consistance du matériau : les briques moulées avec une terre trop liquide s'effondrent au démoulage et celles moulées avec une terre pas assez liquide adhèrent au moule et sont détériorées au démoulage.

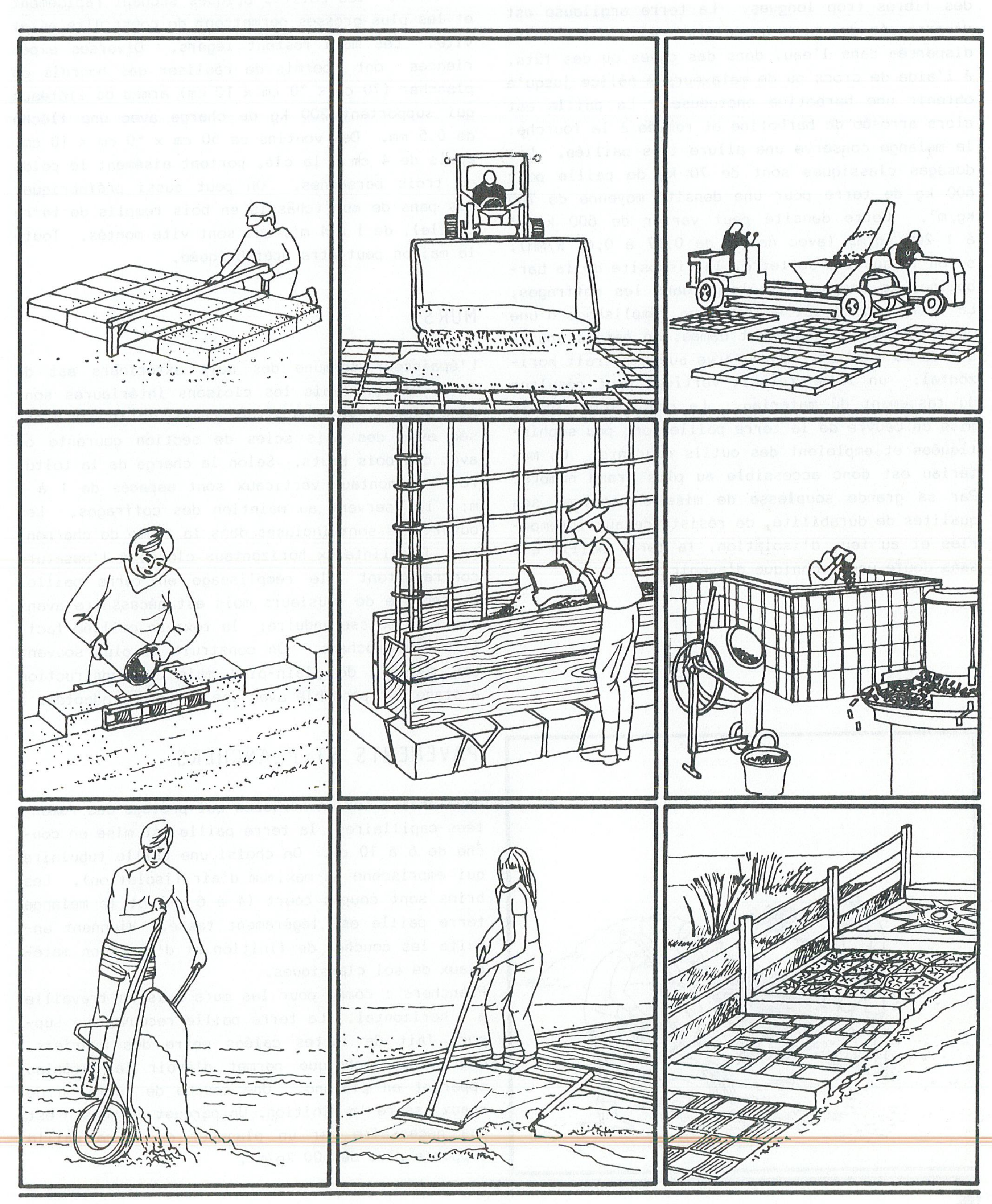
MURS DE TERRE COULES

Il est possible de couler des briques sur place, en créneaux qui sont ensuite comblés. La petite taille des créneaux permet de résoudre le problème du retrait. On emploie des petits coffrages modulaires légers dont le montage est rapide ainsi que le démontage. Ce mode de construction oblige à évoluer en spirale autour du bâtiment. Cette technique est actuellement pratiquée par plusieurs entrepreneurs, aux U.S.A. La terre peut être coulée comme du béton, à la pompe. Les murs monolithiques peuvent être armés par un treillis en acier ou en bambou pour résister aux séismes. Cette technique a été utilisée au Brésil, en 1950, par la P.C.A. A Manaus, l'hôpital Adriano Jorge, d'une superficie de 10 800 m² a été ainsi construit. Les problèmes de fissuration sont importants. Une troisième technique a été élaborée par l'ingénieur David, en Côte d'Ivoire, en 1980, qui consiste en une préfabrication d'agrégats de terre stabilisée de diamètres variés. Après séchage, ces agrégats sont utilisés comme à l'accoutumée pour faire un béton lié au mortier de terre stabilisée. La mise en oeuvre fait appel à l'emploi de coffrages à béton courants.

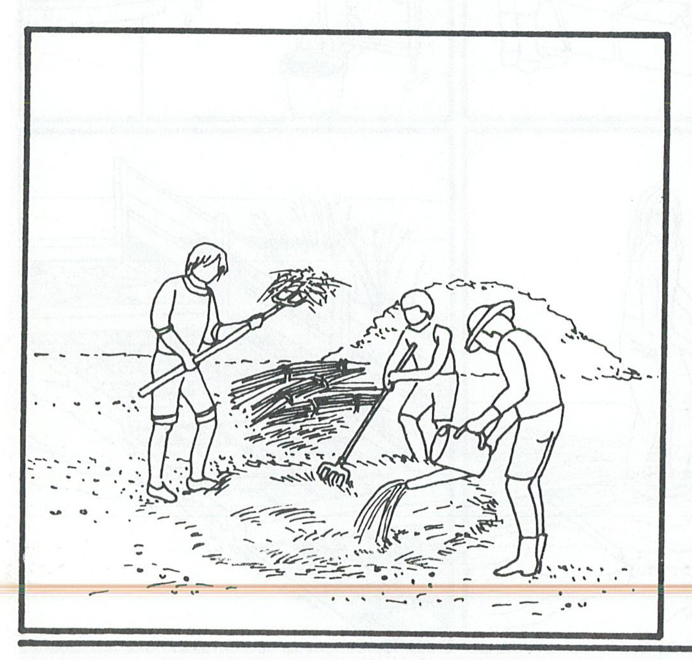
PAVEMENTS

Pour réaliser des pavements, la technique de la terre coulée est particulièrement facile à mettre en oeuvre. Là encore, le savoir-faire est indispensable afin d'éviter l'aspect inesthétique des fissurations. Le sol de support doit être convenablement préparé et correctement drainé (forme de sable ou hérisson de pierres). Ces pavements en terre coulée peuvent être décorés de motifs géométriques ou présenter l'apparence d'un dallage mais il est alors nécessaire de prévoir des joints de retrait. On peut également envisager une coloration du sol avec différentes teintes, tel que le pratiquaient les indiens du Sud-Ouest des U.S.A. La durabilité des pavements en terre coulée peut être améliorée par l'emploi de durcisseurs de surface ou d'imperméabilisants tels que l'asphalte ou l'huile de lin qui donne d'excellents résultats. Cette technique s'accorde avec la réalisation de pavements intérieurs aussi bien qu'extérieurs. Le ciment peut être employé : la technique dénommée plastic-soil-cement est utilisée pour la réalisation d'allées et même de canaux d'irrigation ou de drainage. Aux U.S.A., des machines spéciales ont été développées.

portant retrait au séchage. Ce problème peut être résolu par la stabilisation, par un compartimentage des ouvrages coulés ou par une obturation ultérieure des fissures lorsque de graves malfaçons structurales ne sont pas à déplorer. Par ailleurs, la terre coulée est adaptée à l'utilisation de toute la gamme d'outils de la technologie du béton, y compris l'emploi de pompes à béton. Cette technologie peut être appelée à des développements futurs.



La terre sert à lier les brins de paille entre eux. Toutes sortes de pailles conviennent : blé, orge, seigle, froment, escourgeon mais aussi d'autres fibres comme le foin ou la bruyère. La paille est bien cardée; 15 à 40 cm est la meilleure longueur des brins au risque de créer des nids avec des fibres trop longues. La terre argileuse est débarrassée des gros granulats; elle est ensuite dispersée dans l'eau, dans des cuves ou des fûts, à l'aide de crocs ou de malaxeurs à hélice jusqu'à obtenir une barbotine onctueuse. La paille est alors arrosée de barbotine et remuée à la fourche; le mélange conserve une allure très paillée. Les dosages classiques sont de 70 kg de paille pour 600 kg de terre pour une densité moyenne de 700 kg/m³. Cette densité peut varier de 600 kg/m³ à 1 200 kg/m3 (avec des λ de 0,17 à 0,47 W/MH), selon la qualité de terre, la viscosité de la barbotine, le damage du mélange dans les coffrages. La terre paille est employée en remplissage d'une ossature bois, légèrement damée, en parois épaisses de 15 à 30 cm. On observe aucun retrait horizontal; un léger retrait vertical peut résulter du tassement du matériau. La préparation et la mise en oeuvre de la terre paille sont peu sophistiquées et emploient des outils courants. Ce matériau est donc accessible au plus grand nombre. Par sa grande souplesse de mise en oeuvre, ses qualités de durabilité, de résistance aux intempéries et au feu, d'isolation, la terre paille est sans doute une technique d'avenir.



ELEMENTS

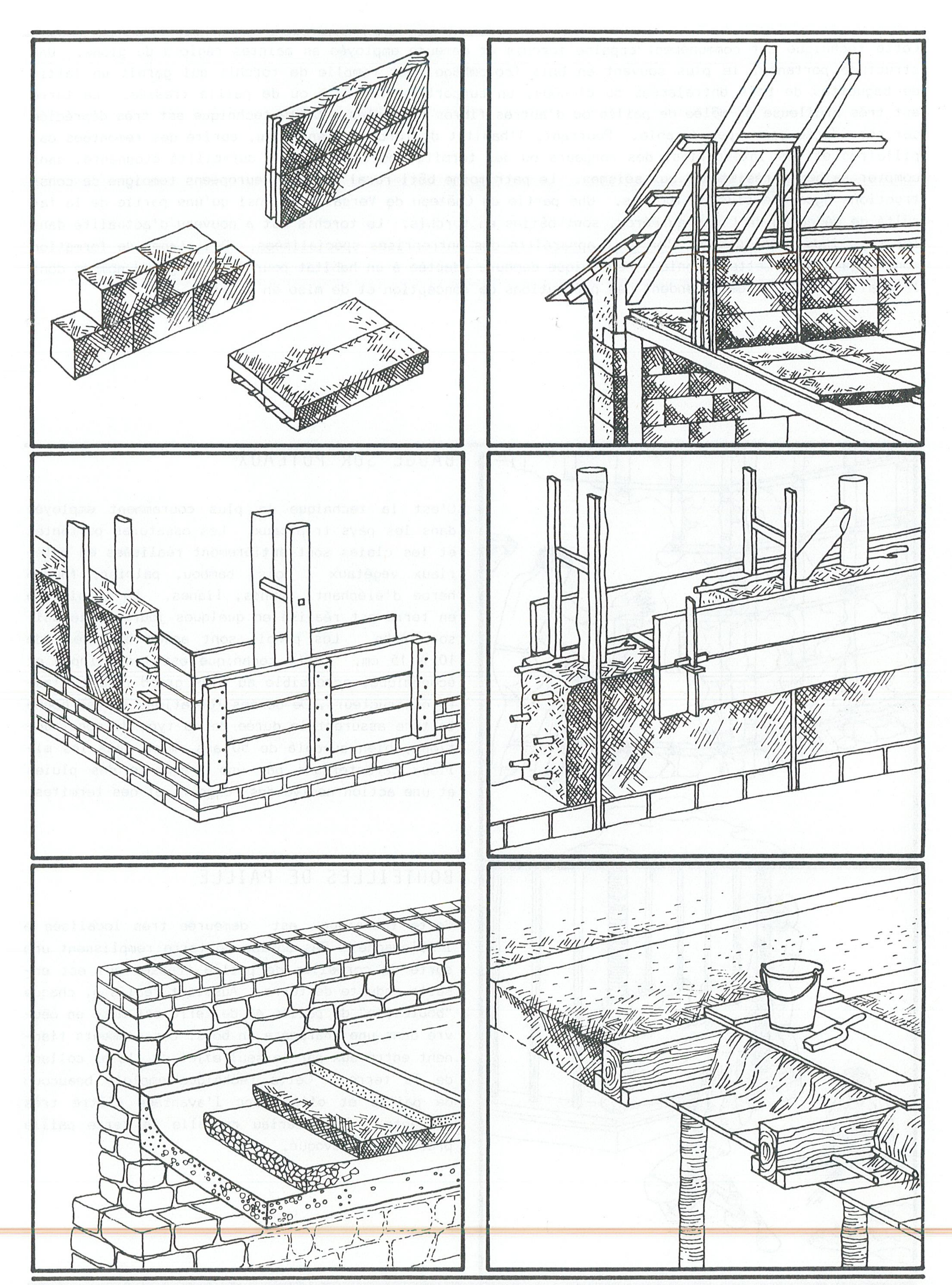
La terre paille est adaptée à la préfabrication d'éléments de construction divers. Ce sont en effet des briques qui seront bâties au mortier de terre. Les petites briques sèchent rapidement et les plus grosses permettent de construire assez vite. Les murs restent légers. Diverses expériences ont permis de réaliser des hourdis de plancher (70 cm x 30 cm x 10 cm) armés de linteaux qui supportent 200 kg de charge avec une flèche de 0,5 mm. Des voutins de 50 cm x 50 cm x 10 cm, épais de 4 cm à la clé, portent aisément le poids de trois personnes. On peut aussi préfabriquer des pans de mur (châssis en bois remplis de terre paille), de 1 à 4 m², qui sont vite montés. Toute la maison peut être préfabriquée.

MURS

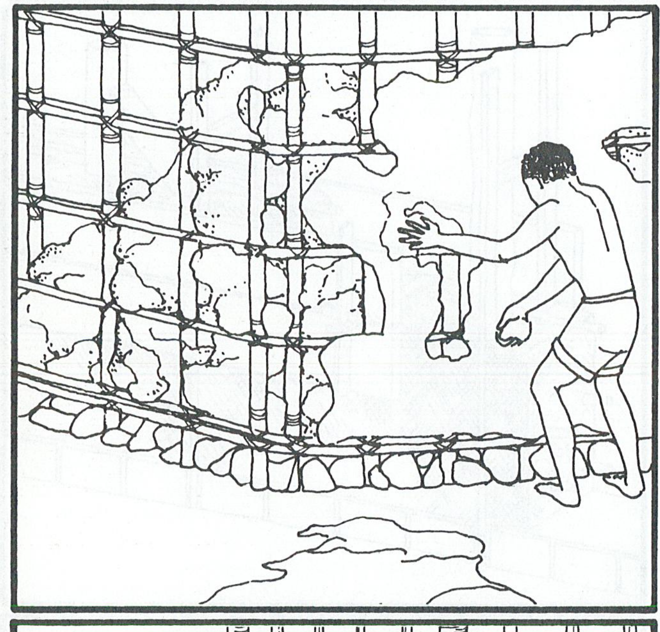
L'épaisseur commune des murs extérieurs est de 20 à 30 cm. Mais les cloisons intérieures sont plus minces, environ 12 cm. La structure est dressée avec des bois sciés de section courante ou avec des bois bruts. Selon la charge de la toiture, les montaux verticaux sont espacés de 1 à 2 m; ils servent au maintien des coffrages. Les ouvertures sont incluses dans la trame de charpente. Des linteaux horizontaux cloués à l'ossature contreventent le remplissage en terre paille. Un séchage de plusieurs mois est nécessaire avant que l'on puisse enduire; la texture paillée facilite l'accrochage. On construit le plus souvent des maisons de plain-pied mais la construction à étage est possible avec une structure adaptée.

PAVEMENTS ET PLANCHERS

Pavements : sur un hérisson qui protège des remontées capillaires, la terre paille est mise en couche de 6 à 10 cm. On choisi une paille tubulaire qui emprisonne un maximum d'air (isolation). Les brins sont coupés court (4 à 6 cm) et le mélange terre paille est légèrement tassé. Viennent ensuite les couches de finition et d'usure en matériaux de sol classiques.
Planchers : comme pour les murs mais on travaille à l'horizontal. La terre paille recouvre un support fait de lattes calées entre des madriers. Une autre technique permet d'avoir le matériau apparent en plafond. Une couche de terre ou de chaux assure la finition. Un parquet en bois n'est pas nécessaire car un plancher en terre paille supporte plus de 500 kg/m².

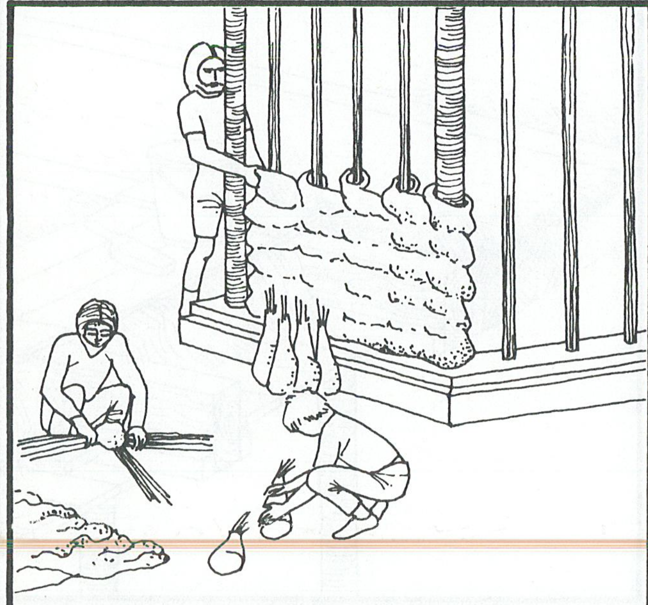


Cette technique est communément appelée torchis et demeure employée en maintes régions du globe. Une structure portante, le plus souvent en bois (colombage) est remplie de torchis qui garnit un lattis de baguettes de bois entrelacées ou clouées, un support de vannerie ou de paille tressée. La terre est très argileuse et mêlée de paille ou d'autres fibres végétales. Cette technique est très dépréciée car considérée comme peu durable. Pourtant, l'habitat de torchis bien conçu, abrité des remontées capillaires et des intempéries, des rongeurs ou des termites peut être d'une durabilité étonnante, sans compter sa bonne résistance aux séismes. Le patrimoine bâti rural des pays européens témoigne de constructions âgées de plus de 100 ans. Une partie du Château de Versailles ainsi qu'une partie de la faculté de médecine de Lima, au Pérou, sont bâties en torchis. Le torchis est à nouveau d'actualité dans les pays industrialisés et l'on voit apparaître des entreprises spécialisées. Des stages de formation sont organisés. Cette technique économique demeure adaptée à un habitat pour le plus grand nombre dont la qualité et la durée dépendent des précautions de conception et de mise en oeuvre.



BAUGE SUR POTEAUX

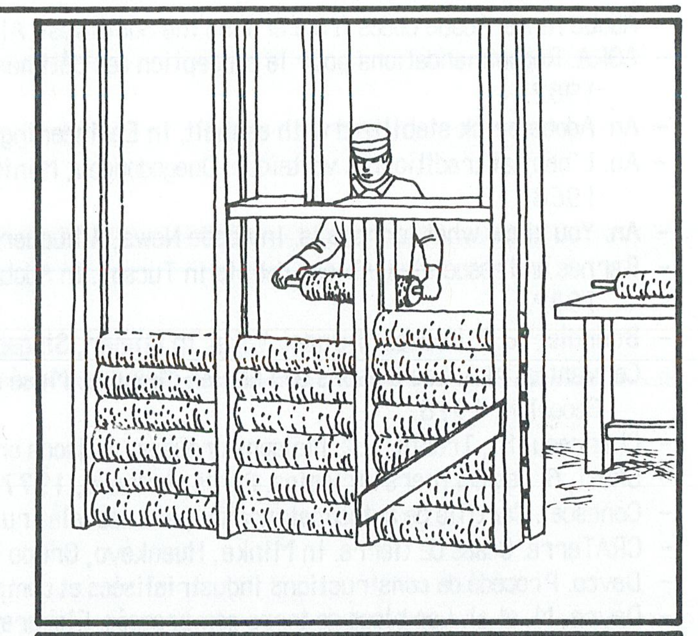
C'est la technique la plus couramment employée dans les pays tropicaux. Les ossatures portantes et les claies sont entièrement réalisées en matériaux végétaux : bois, bambou, palmier, fausse herbe d'éléphant, cannis, lianes. Le garnissage en terre est réalisé en quelques jours, à la saison sèche. Les parois sont assez épaisses, de 10 à 15 cm. Cette technique est très simple et économique, accessible au plus grand nombre d'autoconstructeurs. De bonnes fondations et une bonne toiture assurent la durée de ce type de constructions, bien au-delà de 50 ans, même dans les milieux caractérisés par une fréquence des pluies et une action nocive des rongeurs et des termites.



BOUTEILLES DE PAILLE

Cette technique est demeurée très localisée à l'Allemagne. Des boules de terre remplissent une sorte de corbeille de paille tressée qui est ensuite enduite de terre. Aussitôt réalisée, chaque "bouteille" de paille et de terre est mise en oeuvre dans une charpente en bois. Les éléments tiennent entre eux par le seul effet de l'état collant de la terre. Cette technique emploie beaucoup de paille et offre donc l'avantage d'être très isolante. Le matériau rappelle la terre paille précédemment évoqué.

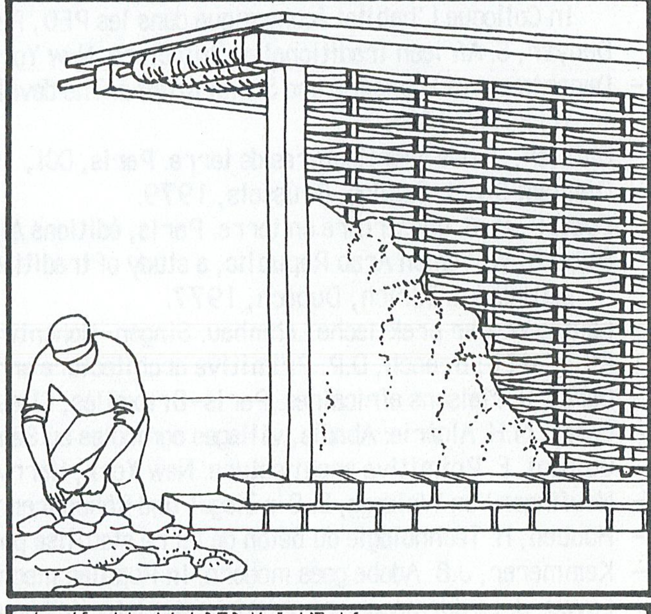
"FUSEES" DE TERRE



De longs brins de paille enduits de terre argileuse sont noués autour de tiges de bois. Les éléments sont stockés jusqu'à ce qu'ils soient à moitié secs puis bâtis dans une structure portante en bois, collés entre eux avec de la terre. Plusieurs variantes de cette technique qui fut employée dans les pays européens existent. Le terme "fusée" de terre désigne cette technique qui fut employée en France, en Anjou. Bien que très isolante et facile à mettre en oeuvre, cette technique n'est plus guère utilisée.

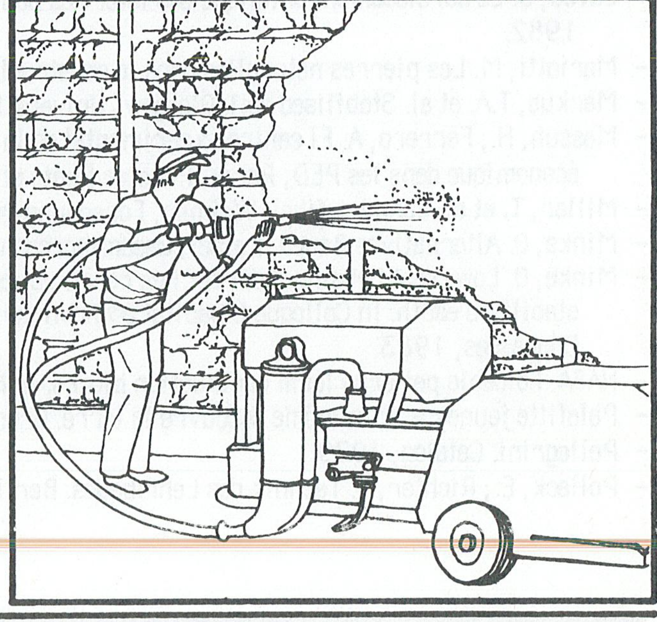


TORCHIS



Le torchis est sans doute l'une des plus anciennes technique de construction qui demeure la plus employée dans le monde. Les structures portantes et les claies qui servent de support au garnissage de torchis sont de conception variée mais le principe de construction reste le même en tous lieux. Dans certaines régions, pour améliorer la durabilité du torchis, la terre était malaxée non pas à l'eau mais à l'urine de cheval : les résultats sont étonnants. Aujourd'hui, le torchis fait l'objet de nombreuses recherches; par exemple, au Pérou, l'ININVI fait des essais de panneaux préfabriqués faciles à assembler. On s'attache également à retrouver les "tours de main" ancestraux.

TERRE PROJETEE



Le torchis est une technique qui est restée fondamentalement manuelle. Récemment, dans le cadre d'un gros projet de logements en Côte d'Ivoire, des essais de projection de la terre sur des supports en bois, en bambou ou en métal déployé, ont été tentés. La technique emploie des pompes à enduit à forte pression pneumatique. Les principales difficultés sont l'obtention d'une bonne consistance de la terre, car une matière trop boueuse présente beaucoup de retrait, et l'obturation des tuyaux des pompes par les fibres végétales qui s'accumulent en noeuds ou en bouchons. Ces problèmes ne sont pas encore résolus et nécessitent une adaptation du matériel de projection.

- Adobe News. Adobe codes from around the Southwest. Albuquerque, Adobe News, 1982.
- AGRA. Recommandations pour la conception des bâtiments du village terre. Grenoble, AGRA, 1982.
- An. Adobe brick stabilized with asphalt. In Engineering News Record, 1948.
- An. L'habitat traditionnel voltaïque. Ouagadougou, Ministère du plan et des travaux publics, 1968.
- An. You know what terrone is. In Adobe News, Albuquerque, Adobe News, 1978.
- Barnes and associates. Ablobe debuts in Tucson. In Adobe Today, Albuquerque, Adobe News, 1982.
- Bourdier, J.P. Houses of Upper Volta. In Mimar, Singapore, Mimar, 1982.
- Cervantes, M.A. Les trésors de l'ancien Mexique. Musé national d'anthropologie. Barcelona, Geocolor, 1978.
- Charneau, H.; Trebbi, J.C. Maisons creuses, maisons enterrées. éditions Alternatives, 1981.
- Chesi, G. Les derniers africains. Paris, Arthaud, 1977.
- Conescal. Cartilla de autoconstrucción para escuelas rurales. México, Conescal, 1978.
- CRATerre. Casas de tierra. In Minka, Huankayo, Grupo Talpuy, 1982.
- Davco. Procédé de constructions industrialisées et composants. Priv. com. Paris, 1982.
- Dayre, M. et al. Les blocs de terre compressés. Elaboration d'un savoir faire approprié. In Colloque L'habitat économique dans les PED, Paris, Presses Ponts et Chaussées, 1983.
- Denyer, S. African traditional architecture. New York, Africana, 1978.
- Department of Economic and Social Affairs. The development potential of dimension stone, New York, UN, 1976.
- Dethier, J. Des architectures de terre. Paris, CCI, 1981.
- Diamant Boart. Catalog, Brussels, 1979.
- Doat, P. et al. Construire en terre. Paris, éditions Alternatives et Parallèles, 1979.
- Dubach, W. Yemen Arab Republic, a study of traditional forms of habitation and types of settlement. Zürich, Dubach, 1977.
- Fauth, W. Der praktische Lehmbau. Singen-Hohentwiel, Weber, 1948.
- Fitch, J.M.; Branch, D.P. Primitive architecture and climate. In Scientific American, 1960.
- Gardi, R. Maisons africaines. Paris-Bruxelles, Elsevier Séquoia, 1974.
- Gossé, M.H. Algérie: Abadla, villages agricoles au Sahara. In A+, 1975.
- Guidoni, E. Primitive architecture. New York, Harry N. Abrams, 1975.
- Heufinger Von Waldegg, E. Die Ziegel und Röhenbrennerei. Leipzig, Theodor Thomas, 1891.
- Houben, H. Technologie du béton de terre stabilisé pour l'habitat. Sidi Bel Abbes, CPR, 1974.
- Kemmerer, J.B. Adobe goes modern. In Popular mechanics, 1951.
- Lavau, J. Le durcissement chimique des latérites pour le bâtiment. Priv. com. St Quentin, 1982.
- Mariotti, M. Les pierres naturelles dans la construction. Paris, CEBTP, 1981.
- Markus, T.A. et al. Stabilised soil. Glasgow, University of Strathclyde, 1979.
- Massuh, H.; Ferrero, A. El centro experimental de la vivienda económica. In Colloque L'habitat économique dans les PED, Paris, Presses Ponts et Chaussées, 1983.
- Miller, T. et al. Lehmbaufibel. Weimar, Forschungsgemeinschaften Hochschule, 1947.
- Minke, G. Alternatives Bauen. Kassel, Gesamthochschul-Bibliothek, 1980.
- Minke, G. Low-cost housing. Appropriate construction techniques with loam, sand and plant stabilized earth. In Colloque L'habitat économique dans les PED, Paris, Presses Ponts et Chaussées, 1983.
- NASA. Foldable patterns form contruction blocks. In NASA Tech Brief, NASA, 1971.
- Palafitte jeunesse. Minimôme découvre la terre. Grenoble, Palafitte Jeunesse, 1975.
- Pellegrini. Catalog, 1979.
- Pollack, E.; Richter, E. Technik des Lehmbaues. Berlin, Verlag Technik, 1952.

- Reuter, K. Lehmstakbau als Beispiel wirtschaftlichen Heimstättenbaues. In Die Volkswohnung, 1923.
- Riedter. Catalog, 1983.
- Rock. Catalog, 1983.
- Rudofsky, B. The prodigious builders. New York, Harcourt Brace Jovanovich, 1977.
- Schöttler, W. Das Dünner Lehmbauverfahren. In Natur Bauweisen, Berlin, 1948.
- Schultz, K. Adobe craft illustrated manual. Castro Valley, Adobe Craft, 1972.
- Schuyt, M. et al. Les bâtisseurs de rêve. Paris, Chêne-Hachette, 1980.
- Smith, E. Adobe bricks in New Mexico. Socorro, New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, 1982.
- Studie. Résumé de proposition village terre de l'Isle d'Abeau. Priv. com. 1981.
- Svare, T.I. Stabilized soil blocks. In BRU data sheet, Dar-Es-Salaam, BRU, 1974.
- The Underground Space Center. Earth sheltered housing design. New York, Van Nostrand Rheinhold company, 1979
- Turbosol. Catalog, 1974.
- Vallery-Radot, N. Des toits d'herbe sage. In La maison, 1980.
- Vibromax. Catalog, 1983.
- Vidal, H. et al. Architerre habitat-paysage. In annales ITBTP, Paris, 1981.
- Webb, D.J.T. Stabilized soil construction in Kenya. In Colloque L'habitat économique dans les PED, Paris, Presses Ponts et Chaussées, 1983.
- Welsch, R.L. Sod walls. Broken Bow, Purcells Inc., 1968.
- Yurchenko, P.G. Methods of construction and of heat insulation in the Ukraine. In RIBA journal, London, 1945.

900 PROCEDES DE PRODUCTION

Les procédés de production sont aussi variés que les procédés de construction.

Quatre de ces procédés ont connus et connaissent un développement technologique tel qu'aujourd'hui ils atteignent un degré de sophistication égal à celui des autres matériaux de construction industriels.

On ne peut donc plus taxer la terre comme un matériau exclusivement artisanal, relégué à une utilisation en troisième zone.

Le gouffre entre les procédés artisanaux et industriels a été comblé. Les artisans de la terre ne sont donc plus condamnés à travailler un matériau sans potentiel de développement industriel.

POTENTIEL DE DEVELOPPEMENT

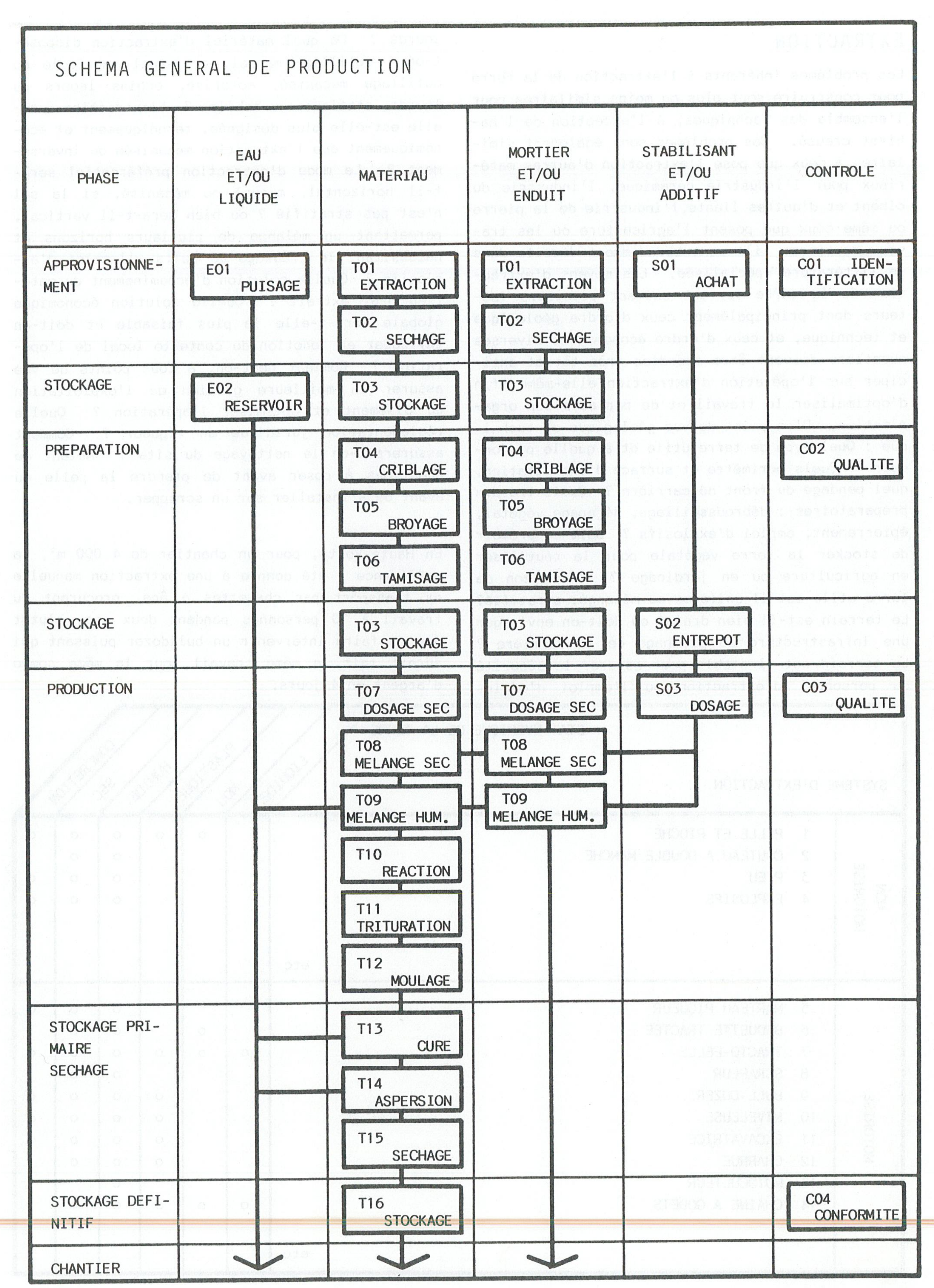
La construction en terre développe aujourd'hui des techniques de production dont le registre admet tout autant le procès le plus rudimentaire, manuel, artisanal, et le procès le plus sophistiqué, industriel, mécanisé, voire automatisé. Dans la partie haute de ce registre, le procès de production de la terre n'a rien à envier à celui d'autres matériaux de construction actuels, parmi les plus élaborés. Certaines usines de production de terre stabilisée, livrées "produit en main" approchent une valeur d'investissement de 1.000.000 US $. Cette tendance à l'industrialisation s'est affirmée il y a environ 25 ans pour la production des blocs comprimés, p.e. Aujourd'hui, si cette tendance arrive à son épanouissement technique, elle n'est pas forcément nécessaire ni peut être souhaitable, selon le contexte abordé; néanmoins, cette tendance est désormais une réalité sur laquelle il faut compter. La technologie de la terre ne relève donc plus de pratiques strictement artisanales ou de troisième zone qui serait dépourvue de potentialité de développement. L'évolution de l'artisanal à l'industriel est possible mais il est évident que cette tendance doit être justifiée au regard de paramètres de situation particuliers: politique de développement régional,aspects socio-économiques et culturels, dépendance économique et technologique, investissements, procès de travail, etc ...

P.e., sur le mode artisanal, 5 personnes produisent de 500 (Afrique de l'Ouest) à 2 500 adobes/jour (Egypte, Iran) pour un investissement nul. Sur le mode industriel, 5 personnes produisent jusqu'à 20 000 adobes/jour (USA) avec un investissement de l'ordre de 300 000 US $. L'engouement actuel pour la mécanisation ne permet pas souvent d'atteindre les quantités ni les qualités espérées. Notons ici cette assertion de Joe Tibbets dans la revue américaine Adobe Today : "A machine is no better than the soil you put into it." (1) Ce n'est pas la machine qui garantit la qualité de la production mais l'organisation de la production et le savoir-faire des opérateurs. Les rendements réels d'une production mécanisée correspondent souvent au 1/10 des prétentions commerciales et les produits de belle apparence à la démonstration deviennent lamentables après quelques années. Aujourd'hui, l'universalité de la construction en terre exige que l'on procède à une étude approfondie des outils de production à tous les stades du procès de production et jusqu'à la mise en oeuvre et l'entretien. Ici on se limitera aux 3 techniques les plus employées sur les douze inventoriées : le bloc comprimé, le pisé, l'adobe.

CYCLE DE PRODUCTION

Quels que soient les modes de production, manuels ou mécanisés, les modes opératoires suivent plus ou moins des stades identiques. C'est notamment vrai pour les phases d'extraction, de transport, de séchage préliminaire, de stockage du matériau brut, pour le broyage et le criblage, le dosage et le malaxage, le séchage et le stockage du produit final. Mais il est évident que chaque technique demande une adaptation particulière du schéma de production général. Certains postes pourront être supprimés, dédoublés ou inversés. La référence à ce schéma permettra au constructeur d'estimer les rendements et les temps d'exécution plus aisément.

- T01 EXTRACTION de la terre d'une carrière.
- T02 SECHAGE par épandage en couches minces, en petits tas aérés ou en cyclone à air chaud.
- T03 STOCKAGE d'une réserve de terre brute ou préparée sur l'aire de production.
- T04 CRIBLAGE si la terre a trop de gros cailloux qui doivent être écartés.
- T05 BROYAGE pour désagréger les concrétions d'argile.
- T06 TAMISAGE pour éliminer les éléments indésirables après la préparation générale.
- T07 DOSAGE SEC de la terre en poids ou en volume en vue de son mélange avec l'eau et/ou le stabilisant.
- T08 MELANGE SEC pour un maximum d'efficacité du stabilisant en poudre.
- T09 MELANGE HUMIDE :ajout de l'eau par aspersion après mélange sec correct ou directement avec un stabilisant liquide.
- T10 REACTION : temps de retenue variable selon la nature du stabilisant; très court au ciment, plus long à la chaux.
- T11 TRITURATION :favorable juste avant de mettre en oeuvre la terre.
- T12 MOULAGE : mise en forme finale de la terre par différents procédés.
- T13 CURE : conditions qui conviennent au mieux aux premiers temps de séchage.
- T14 ASPERSION : si nécessaire pour permettre une bonne hydratation du stabilisant.
- T15 SECHAGE : pendant une période suffisante pour garantir une qualité acceptable du produit.
- T16 STOCKAGE FINAL: produits en attente et prêts à l'emploi.



SCHEMA GENERAL DE PRODUCTION
PHASE
EAU ET/OU LIQUIDE
MATERIAU
MORTIER ET/OU ENDUIT
STABILISANT ET/OU ADDITIF
CONTROLE
APPROVISIONNEMENT
E01 PUISAGE
T01 EXTRACTION
T01 EXTRACTION
S01 ACHAT
C01 IDENTIFICATION
T02 SECHAGE
T02 SECHAGE
STOCKAGE
E02 RESERVOIR
T03 STOCKAGE
T03 STOCKAGE
PREPARATION
T04 CRIBLAGE
T04 CRIBLAGE
C02 QUALITE
T05 BROYAGE
T05 BROYAGE
T06 TAMISAGE
T06 TAMISAGE
STOCKAGE
T03 STOCKAGE
T03 STOCKAGE
S02 ENTREPOT
PRODUCTION
T07 DOSAGE SEC
T07 DOSAGE SEC
S03 DOSAGE
C03 QUALITE
T08 MELANGE SEC
T08 MELANGE SEC
T09 MELANGE HUM.
T09 MELANGE HUM.
T10 REACTION
T11 TRITURATION
T12 MOULAGE
STOCKAGE PRIMAIRE SECHAGE
T13 CURE
T14 ASPERSION
T15 SECHAGE
STOCKAGE DEFINITIF
T16 STOCKAGE
C04 CONFORMITE
CHANTIER

EXTRACTION

Les problèmes inhérants à l'extraction de la terre pour construire sont plus ou moins similaires pour l'ensemble des techniques, à l'exception de l'habitat creusé. Ces problèmes sont également similaires à ceux que pose l'extraction d'autres matériaux pour l'industrie céramique, l'industrie du ciment et d'autres liants, l'industrie de la pierre ou même ceux que posent l'agriculture ou les travaux routiers; ils sont abondamment décrits dans la littérature spécialisée. Les moyens d'extraction de la terre varient suivant plusieurs facteurs dont principalement ceux d'ordre géologique et technique, et ceux d'ordre économique. Diverses questions doivent être abordées très tôt et anticiper sur l'opération d'extraction elle-même afin d'optimaliser le travail et de parfaire son organisation. D'un point de vue géologique et technique : Quel type de terre utile et à quelle profondeur ? Quels périmètre et surface d'exploitation, quel pendage du front de carrière ? Quels travaux préparatoires : débroussaillage, décapage végétal, épierrement, emploi d'explosifs ? Doit-on prévoir de stocker la terre végétale pour la réutiliser en agriculture ou en jardinage ? L'horizon de terre utile est-il uniforme ou mélangé, stratifié? Le terrain est-il bien drainé ou doit-on envisager une infrastructure de drainage de la carrière ? Le terrain est-il stable pour assurer la sécurité du personnel d'extraction ou l'emploi d'engins lourds ? De quel matériel d'extraction dispose-t-on : outillage manuel, artisanal, agricole ou outillage mécanisé, motorisé, engins légers ou lourds, statiques ou mobiles ? L'extraction manuelle est-elle plus désignée, techniquement et économiquement que l'extraction mécanisée ou inversément ? Le mode d'extraction préférentiel sera-t-il horizontal, manuel ou mécanisé, si le sol n'est pas stratifié ? ou bien sera-t-il vertical, permettant un mélange de plusieurs horizons et nécessitant le creusage de puits, l'emploi d'explosifs ? Quelle solution d'acheminement du matériau brut extrait ? Quelle solution économique globale sera-t-elle la plus faisable et doit-on envisager en fonction du contexte local de l'opération ? Comment peut-on, à tous points de vue assurer la meilleure gestion de l'exploitation du gisement et optimiser l'opération ? Quelle règlementation juridique en vigueur ? Comment assurera-t-on le nettoyage du site ? Autant de questions à poser avant de prendre la pelle ou avant de s'installer sur un scrapper.

En Haute-Volta, pour un chantier de 4 000 m², la préférence a été donnée à une extraction manuelle et transport par charettes à âne, procurant du travail à 10 personnes pendant deux ans, plutôt que de faire intervenir un bulldozer puissant qui aurait fait le même travail pour la même somme d'argent en 4 jours.

SYSTEME D'EXTRACTION / ETAT HYDRIQUE DE LA TERRE		LIQUIDE	MOU	PLASTIQUE	HUMIDE	SEC	CONCRETION
NON MOTORISE	1 PELLE ET PIOCHE		o	o	o	o	o
	2 COUTEAU A DOUBLE MANCHE				o	o	
	3 PIEU				o	o	o
	4 EXPLOSIFS				o	o	o
	etc						
MOTORISE	5 MARTEAU PIQUEUR				o	o	o
	6 BROUETTE TRACTEE		o		o	o	
	7 TRACTO-PELLE	o	o	o	o	o	o
	8 SCRAPEUR				o	o	
	9 BULL-DOZER			o	o	o	o
	10 NIVELEUSE			o	o	o	o
	11 EXCAVATRICE			o	o	o	o
	12 CHARRUE			o	o	o	
	13 MOTOCULTEUR				o		
	14 CHAINE A GODETS	o	o	o	o	o	
	etc						

TRANSPORT

Les facteurs techniques du choix des modes de transport de la terre sont dépendant de la nature de la terre, de son état hydrique, des conditions d'exploitation de la carrière. Techniquement, les problèmes du transport doivent être envisagés à tous les stades de la chaîne de production globale du matériau mais ils ne sont pas réellement spécifiques à la technologie de la terre crue. L'exploitation d'autres matériaux en carrière et dans les phases ultérieures de production en composants de construction y est aussi confrontée. Ainsi, le transport sera envisagé autant au stade de l'extraction en carrière qu'aux stades successifs d'approvisionnement de l'aire de production, de la briqueterie et d'acheminement vers les chantiers, directement (pisé p.e.) ou après réalisation des produits (briques p.e.). Le transport est lié à l'appréciation des distances, à la reconnaissance des niveaux du terrain qui favorisent la réalisation de chemins et d'accès, à la possibilité ou l'impossibilité d'user d'un réseau de voirie existant. Ce sont aussi des problèmes de périmètre d'exploitation et d'aménagement des abords pour favoriser une bonne manoeuvre des outils du transport, des problèmes de stabilité du terrain dans le cas d'une circulation d'engins lourds. Ce sont des problèmes de sécurité du personnel d'extraction, des transporteurs eux-mêmes, du personnel de production au voisinage des briqueteries, des ouvriers sur les chantiers à proximité des aires de stockage. Ce sont enfin des choix techniques sur les moyens et les modes du transport qui sont appréciés à la fois au regard des contraintes géologiques et techniques d'exploitation des carrières, des contraintes techniques et sous-économiques des aires de production et des chantiers et en fonction de l'économie globale de la gestion optimale de la production. Viennent alors les choix sur les outils nécessaires, contrebalancés par leur disponibilité ou leur indisponibilité, par l'économie de leur emploi. Selon le contexte, les modes de transport les plus favorables seront manuels, à traction animale ou motorisée et l'on appréciera alors le coût de l'énergie du transport. Dans le cas de grosses exploitations voisines de projets d'envergure, ce sera peut être la possibilité de développer une infrastructure employant des systèmes de chariots sur câbles ou de télébennes, de bandes transporteuses, de wagonnets sur rails, etc... La solution du transport demeure dans bien des cas fondamentale pour assurer l'économie réelle d'une opération et il importe souvent d'alléger au maximum ce poste très lourd de la chaîne de production.

SYSTEME DE TRANSPORT		ETAT HYDRIQUE DE LA TERRE: LIQUIDE	MOU	PLASTIQUE	HUMIDE	SEC	CONCRETION
MOBILE	1 SAC, PANIER, SEAU ...	o	o	o	o	o	o
	2 BROUETTE, BERLINE ...	o	o	o	o	o	o
	3 BROUETTE TRACTEE		o	o	o	o	o
	4 DUMPER, CHARIOT, BASCULEUR ...		o	o	o	o	o
	5 CHARETTE		o	o	o	o	o
	6 CAMION, CAMIONNETTE, PICK-UP ...		o	o	o	o	o
	7 BULL-DOZEUR, CHARGEUR ... etc			o	o	o	o
STATIONNAIRE	8 POMPE A ENDUIT	o					
	9 POMPE A BETON	o	o				
	10 TUYAU A AIR COMPRIME PULSE					o	o
	11 BANDE TRANSPORTEUSE				o	o	o
	12 TELEPHERIQUE	o	o	o	o	o	o
	13 GRUE	o	o	o	o	o	o
	14 WAGONNET SUR RAILS	o	o	o	o	o	o
	etc						

GRADATION

Pour chaque technique de construction en terre, il existe une gradation du matériau préférentielle. Ces gradations doivent être respectées ou approchées le plus possible afin de garantir la qualité du produit transformé ou mis en oeuvre. A son état brut d'extraction, la terre peut présenter deux défauts majeurs.

- 1 - DEFAUT DE TEXTURE :la terre est caractérisée soit par une fraction granulaire en excès, soit en manque : trop d'argile, pas assez de sables, p.e. La terre est trop chargée en gros cailloux ou en matières végétales : racines p.e. Pour ôter des éléments grossiers - cailloux,racines - l'opération est assez aisée : épierrement manuel, nettoyage, criblage manuel ou mécanisé. Pour ôter une fraction plus fine en excès, l'opération est plus délicate : cribler à la maille correcte, ou en plusieurs fractions puis recomposer la terre; lessiver à l'eau pour les argiles : opération problématique qui grève la production et qui peut être anti-économique. Encore faut-il que la fraction granulaire indésirable soit correctement dissociée; car si elle est emprisonnée dans une gangue d'autre matériau, l'opération est difficile et rejoint un problème de structure par la voie de la décomposition de la terre en fractions granulaires indépendantes. Par contre, pour ajouter une fraction granulaire en défaut, l'opération est aisée et relève de l'amendement des terres : elle s'effectue par malaxage.

- 2 - DEFAUT DE STRUCTURE : quand on est en présence d'une terre fragmentaire ou continue, il peut être souhaitable de la désolidariser ou de la broyer, de la pulvériser. La pulvérisation est souvent indispensable pour les blocs comprimés stabilisés au ciment ou à la chaux et garantit en grande partie la qualité du produit. Avec une terre bien composée en fractions nécessaires distinctes et tamisée, les grains, l'eau et le stabilisant en poudre seront harmonieusement distribués et le produit sera d'excellente qualité.

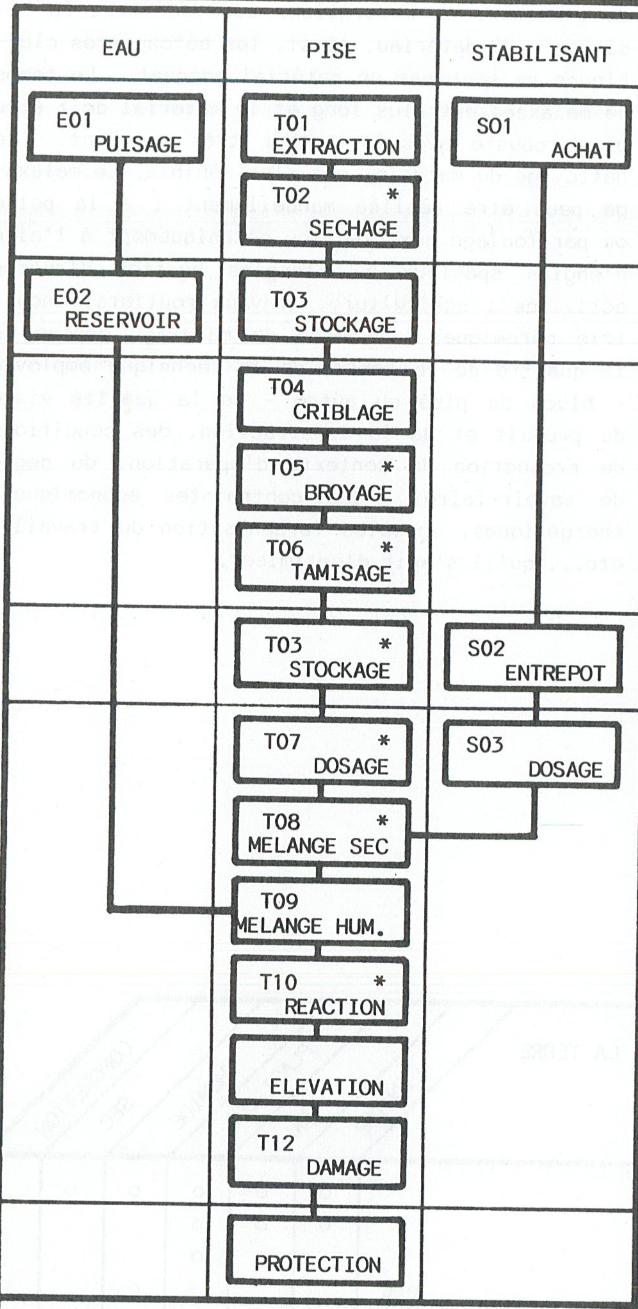
Il est donc souvent nécessaire d'opérer un travail préparatoire sur la texture et la structure. Opération qui peut être manuelle ou outillée. Un matériel spécifique de criblage, de broyage et de pulvérisation a été élaboré par les concepteurs de machines. Mais, selon les conditions du lieu, on pourra faire appel à la main d'oeuvre ou à des outils hérités d'une autre activité : agriculture, travaux publics.

SYSTEME DE GRADATION		ETAT HYDRIQUE DE LA TERRE	LIQUIDE	MOU	PLASTIQUE	HUMIDE	SEC	CONCRETION
TEXTURE	NON MOTORISE	1 SELECTION MANUELLE				o	o	
		2 TAMISAGE A LA PELLE				o	o	
		3 TAMIS ROTATIF OU VIBRANT				o	o	
		etc						
	MOTORISE	4 LAVAGE	o	o				
		5 CRIBLE OU TAMIS VIBRANT				o	o	
		etc						
STRUCTURE	NON MOTORISE	6 BRISEMENT METEOROLOGIQUE				o	o	
		7 BRISEMENT PAR EAU		o		o	o	
		8 PILON					o	o
		9 ROULEAU					o	o
		10 PULVERISATEUR OU BROYEUR				o	o	
		etc						
	MOTORISE	11 ROULEAU				o	o	o
		12 PULVERISATEUR OU BROYEUR				o	o	o
		13 MALAXEUR A FRAISES				o	o	
		14 EMIETTEUR AGRICOLE				o	o	
		15 PASSAGE AVEC ENGINS					o	o
		etc						

MALAXAGE

Peu de terres peuvent être employées telles quelles, aussitôt extraites; elles exigent souvent d'être préparées, broyées, tamisées, pulvérisées avant d'être mélangées, phase qui précède la mise en oeuvre. L'importance du malaxage ne doit pas être sous-estimée car, à l'égal de l'opération amont de pulvérisation, elle garantit la qualité ultérieure du produit et de la construction. Elle en garantit aussi l'économie dans la mesure où elle optimalise les quantités de matériaux et d'adjuvants mélangés dans le cas d'une stabilisation. Le malaxage peut s'opérer soit entre les ingrédients d'une même terre dissociée en fractions granulaires distinctes, soit entre différentes terres -amendement p.e.- soit entre une terre caractérisée et d'autres terres auxquelles sont ajoutés différents adjuvants : eau, stabilisant,.. D'autre part, le malaxage ne s'opère bien qu'entre matériaux secs, ou secs et liquides et liquides. Le mélange sec/humide pose quelques difficultés notamment dans le cas d'une stabilisation aux liants hydrauliques en poudre, ciment ou chaux. Dans ce cas, un mélange préalable à sec est indispensable. L'eau n'est ajoutée que par la suite et progressivement, par aspersion. La réflexion qui précède l'opération de malaxage d'une terre est très différente de celle qui préside au béton; car si le béton n'est pas cohésif, la terre l'est, risquant de provoquer la formation de mottes ou de grumeaux, de concrétions qui réduiront la résistance du matériau. Ainsi, les bétonnières classiques ne sont pas un matériel adéquat. Le temps de malaxage est plus long et le matériel doit être plus robuste avec un moteur très puissant. Le nettoyage du matériel est plus pénible. Le malaxage peut être réalisé manuellement : à la pelle ou par foulage aux pieds,ou mécaniquement à l'aide d'engins spéciaux ou d'engins hérités d'autres activités : agriculture, travaux routiers, industrie céramique. Le mode de malaxage dépend de la qualité de la terre, de la technique employée - blocs ou pisé ou autre - de la qualité visée du produit et de la construction, des conditions de production du contexte d'opération, du degré de savoir-faire, des contraintes économiques, énergétiques, sociales (organisation du travail), etc... qu'il s'agit d'optimiser.

SYSTEME DE MALAXAGE			ETAT HYDRIQUE DE LA TERRE	LIQUIDE	MOU	PLASTIQUE	HUMIDE	SEC	CONCRETION
NON MOTORISE	HOMMES	1	PELLE, HOUE ...	o	o	o	o	o	
		2	PIETINAGE	o	o	o			
		3	BATTAGE			o			
		4	ROTATIF				o		
			etc						
	ANIMAUX	5	PIETINAGE	o	o	o			
			etc						
MOTORISE	ARBRE VERTICAL	6	MALAXEUR PLANETAIRE		o		o		
		7	MALAXEUR VERTICAL			o	o		
		8	MALAXEUR A MEULES	o	o	o			
		9	MALAXEUR A HELICE	o	o				
		10	TURBOMALAXEUR	o					
			etc						
	ARBRE HORIZONTAL	11	MALAXEUR A PALETTES		o		o	o	
		12	MALAXEUR LINEAIRE	o	o	o	o	o	
		13	MALAXEUR A FRAISES		o		o	o	
			etc						



NOTES

- Il convient de rappeler que l'équipe qui produit le matériau de construction construit en même temps la maison.
- Le schéma de production du pisé stabilisé, présenté ci-dessus, fait clairement apparaître la complication qu'introduit la stabilisation.
- La stabilisation requiert une organisation adéquate de la production sous peine de ralentir le procès de production du matériau et de la construction.

* Certaines opérations sont rendues nécessaires par la stabilisation.

1 - PRODUCTION

Dans son principe, le pisé est assez simple; de la terre versée dans un coffrage est damée. Les conditions idéales d'une bonne terre à la bonne humidité ne sont pas toujours réunies. De même, une technologie trop sophistiquée peut infirmer cette simplicité originelle du pisé. Les variantes technologiques sont très nombreuses selon les régions du monde où l'on pratique le pisé.

2 - PRODUIT

L'aspect du pisé est très variable. En simplifiant, on distingue des pisés d'aspect graveleux - damage de la fraction caillouteuse de la terre à l'extérieur du mur - et des pisés très fins - les graviers sont damés à l'intérieur du mur. La texture fine extérieure d'un pisé est dénommée "fleur de pisé". Les graviers apparents accrochent l'enduit. La variété d'aspect provient aussi de la finition, avec ou sans rejointoiement au mortier, p.e.

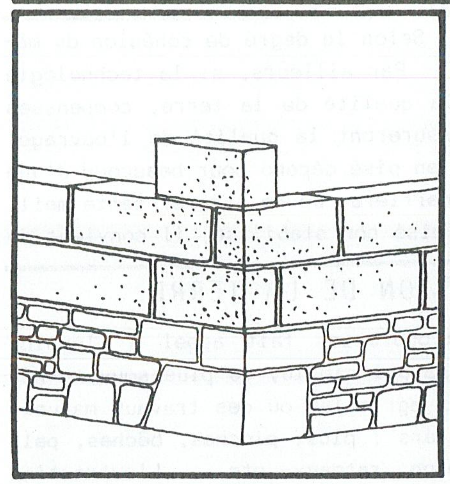
3 - PERIODES DE PRODUCTION

En zone tempérée, on ne construit pas en pisé 3 mois avant et lors des mois de gel. Sous climat humide, on évite la saison des pluies et sous climat chaud et sec, les mois les plus chauds. L'économie locale, agricole p.e., peut aussi dicter des priorités de travail.

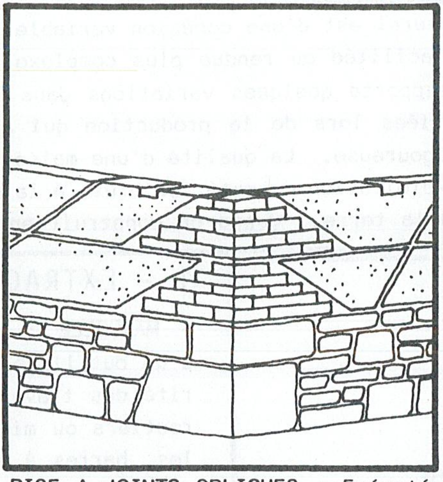
4 - EQUIPES ET RENDEMENTS

La taille des équipes varie selon le type de chantier et les multiples paramètres locaux. Pour des petits chantiers, on pourra constituer des équipes de 5 à 6 ouvriers. Le rendement dépendra énormément des conditions de travail et de la conception du bâtiment.

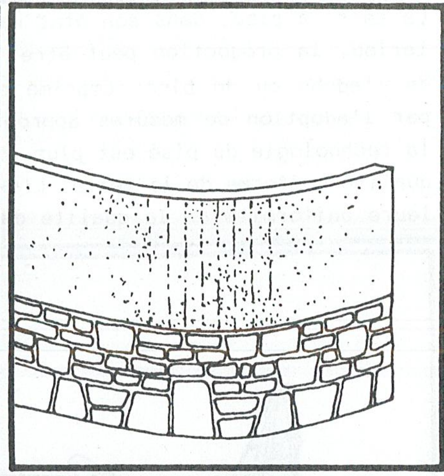
	MANUEL OU MECANISE	TRES MECANISE
INVESTISSEMENT (US $)	200 à 6 000	20 000
EQUIPE (OUVRIERS)	6	5
- Préparation	2	1
- Transport	2	1
- Construction	2	3
RENDEMENT (h/m³)		
- Très bonnes conditions	8-10	5
- Bonnes conditions	15-20	9-10
- Mauvaises conditions	25	15
- Très mauv. conditions	35	30



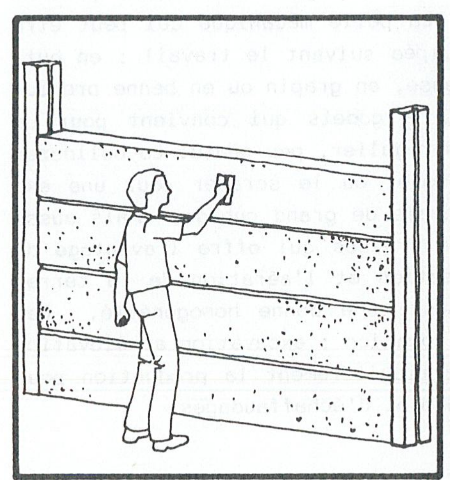
PISE A JOINTS DROITS : Exécuté avec un fond de banche.



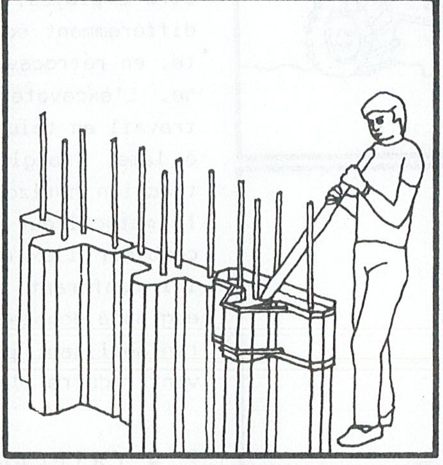
PISE A JOINTS OBLIQUES : Exécuté sans fond de banche.



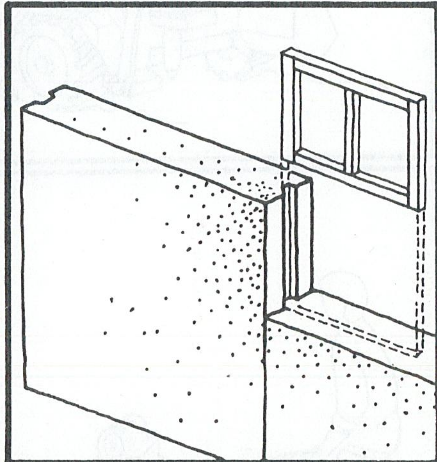
PISE MONOLITHIQUE : Exécuté en coffrage continu.



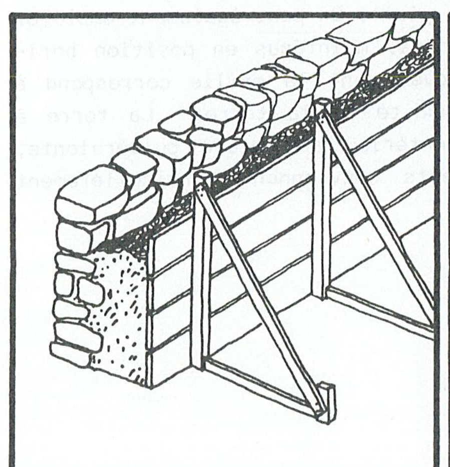
PISE ENTRE POTEAUX : Sur lesquels les banches prennent appui.



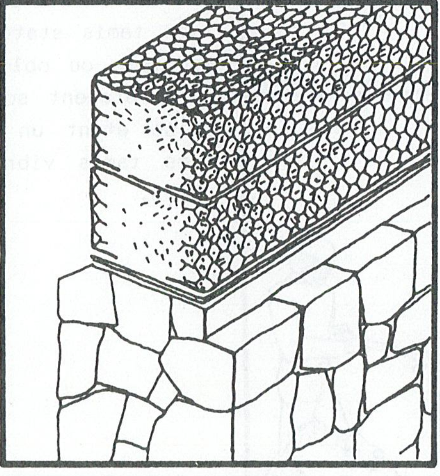
PISE EN PETITS TRUMEAUX : Solidarisés par chaînages.



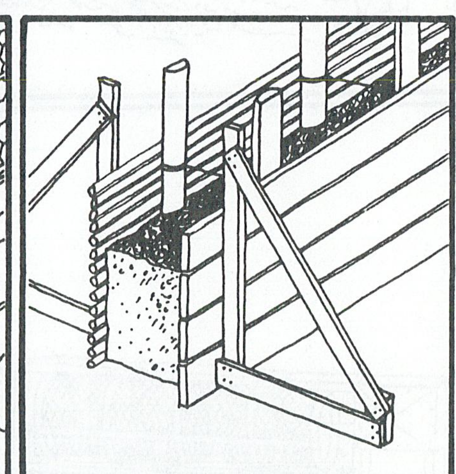
PISE EN GRANDS TRUMEAUX : Solidarisés par chaînages.



PISE A COFFRAGE PERDU : Parement extérieur en pierres de gros appareil.

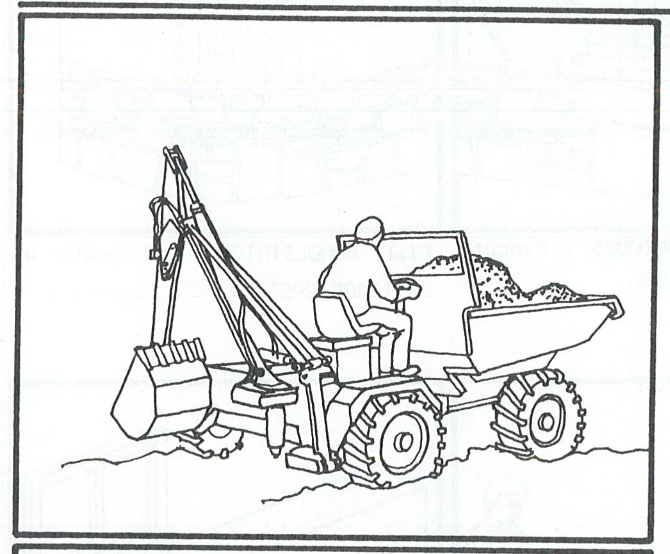


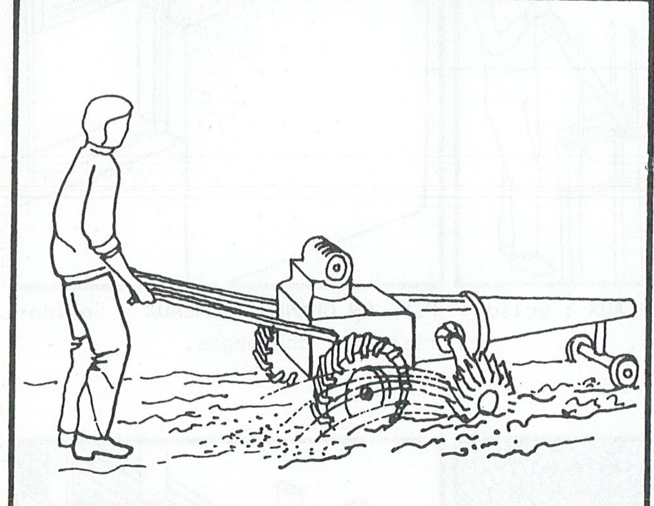
PISE A GABION METALLIQUE : Pour terres expansives.

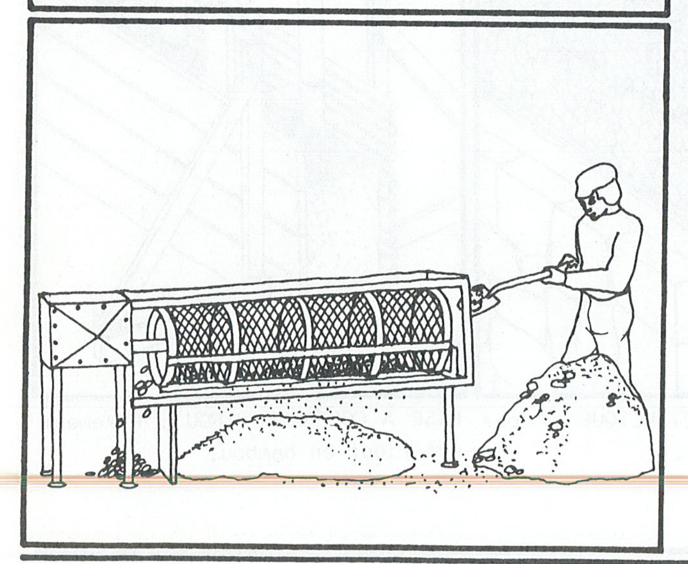


PISE A COFFRAGE PERDU : Parement extérieur en bambou.

La terre à pisé, dans son état naturel est d'une cohésion variable. Selon le degré de cohésion du matériau, la production peut être facilitée ou rendue plus complexe. Par ailleurs, si la technologie de l'adobe ou du bloc comprimé supporte quelques variations dans la qualité de la terre, compensées par l'adoption de mesures appropriées lors de la production qui assureront la qualité de l'ouvrage, la technologie du pisé est plus rigoureuse. La qualité d'une maison en pisé dépend pour beaucoup d'une qualité uniforme de la terre. L'exploitation du matériau brut, à la carrière, devra assurer cette meilleure uniformité de la qualité de la terre. Quand on construit en pisé non stabilisé, il convient de







1 - EXTRACTION DE LA TERRE

- **MANUELLE** : l'opération fait appel à l'emploi d'un outillage manuel simple, le plus souvent hérité des travaux agricoles ou des travaux manuels routiers ou miniers : pics, pioches, bêches, pelles, barres à mine, rateaux, etc ... L'extraction manuelle de la terre exige beaucoup de main-d'oeuvre.

- **MECANIQUE** : divers engins mécaniques peuvent être employés. La pelle mécanique qui peut être différemment équipée suivant le travail : en butte, en rétrocaveuse, en grapin ou en benne preneuse. L'excavateur à godets qui convient pour un travail en talus régulier, peu pentu. Le bulldozer à lame, l'angledozer ou le scraper pour une extraction horizontale de grand cubage. Mais aussi le motoculteur à fraises qui offre l'avantage de combiner l'extraction et l'aération de la terre, lui conférant aussi une bonne homogénéité. Les engins à double vocation : excavation et élévation rentabilisant particulièrement la production pouvant réduire l'emploi d'échafaudages.

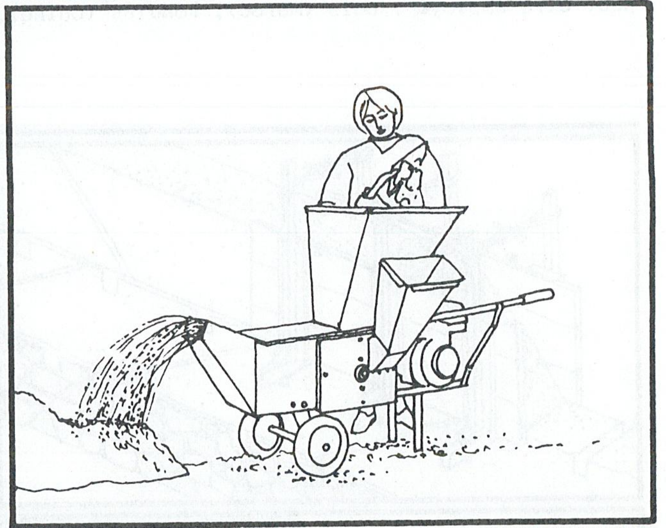
2 - CRIBLAGE

Il est assez fréquent de devoir cribler la terre à pisé. Ce peut être un épierrement manuel des plus gros cailloux de diamètre supérieur à 50 mm (cf. fuseau limite du pisé). On peut également employer des tamis statiques, maintenus en position horizontale ou oblique, dont la maille correspond à l'écrêtement souhaité de la terre. La terre à pisé étant un matériau de nature pulvérulente, les tamis vibrants conviennent particulièrement bien.

s'assurer que la terre employée réponde aux critères de choix, notamment pour sa composition granulaire et son humidité. Il est dans ce cas préférable de travailler avec une bonne terre à son humidité naturelle appropriée : l'ensemble du procès de production est simplifié; ce qui n'est pas le cas lorsque d'autres étapes de criblage, de pulvérisation, de mélange à sec et humide sont nécessaires, pour une stabilisation au ciment ou à la chaux, p.e. On s'efforcera donc de travailler avec une terre la plus idéale possible. De trop grandes variations par rapport au fuseau granulométrique pisé, p.e., sont très préjudiciables à l'économie, au rendement et à la qualité du pisé.

3 - PULVERISATION

Dans le cas d'un pisé stabilisé, la terre doit être pulvérisée. C'est aussi le cas pour une terre trop argileuse agglomérée en mottes dures qui doit être ajoutée d'une fraction sableuse. Il est préférable de grouper les opérations de pulvérisation, de froissage et de mélange. Pour un amendement en sable d'une terre argileuse, un passage alternatif de la fraction argileuse et de l'élément sableux dans le pulvérisateur permettra d'obtenir un assez bon prémélange. Les manipulations suivantes, transport, élévation, épandage dans la banche parfairont le mélange. Le pulvérisateur doit être un engin robuste,car il traite une terre caillouteuse et sableuse, et il doit pouvoir projeter la terre à distance pour permettre une aération et un bon prémélange du matériau.



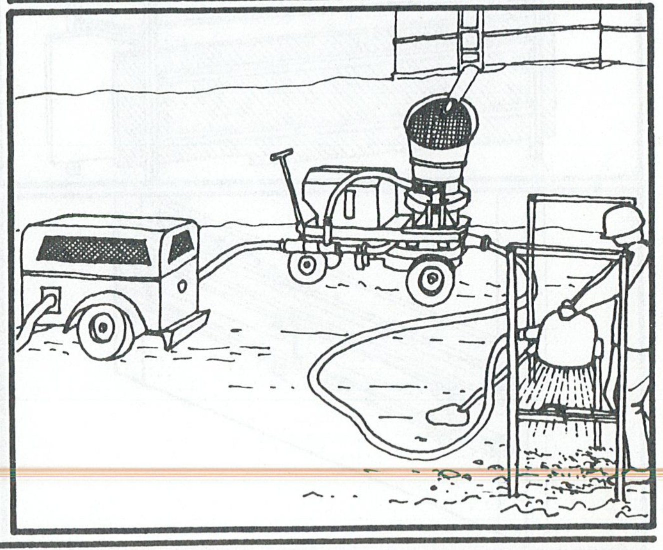
4 - MALAXAGE

Lorsqu'une homogénéisation de la terre est nécessaire ou quand l'on veut ajouter un stabilisant, il convient d'opérer un bon malaxage. L'engin le plus adéquat est le malaxeur à béton, mais le motoculteur donne également un bon résultat dans la plupart des cas.

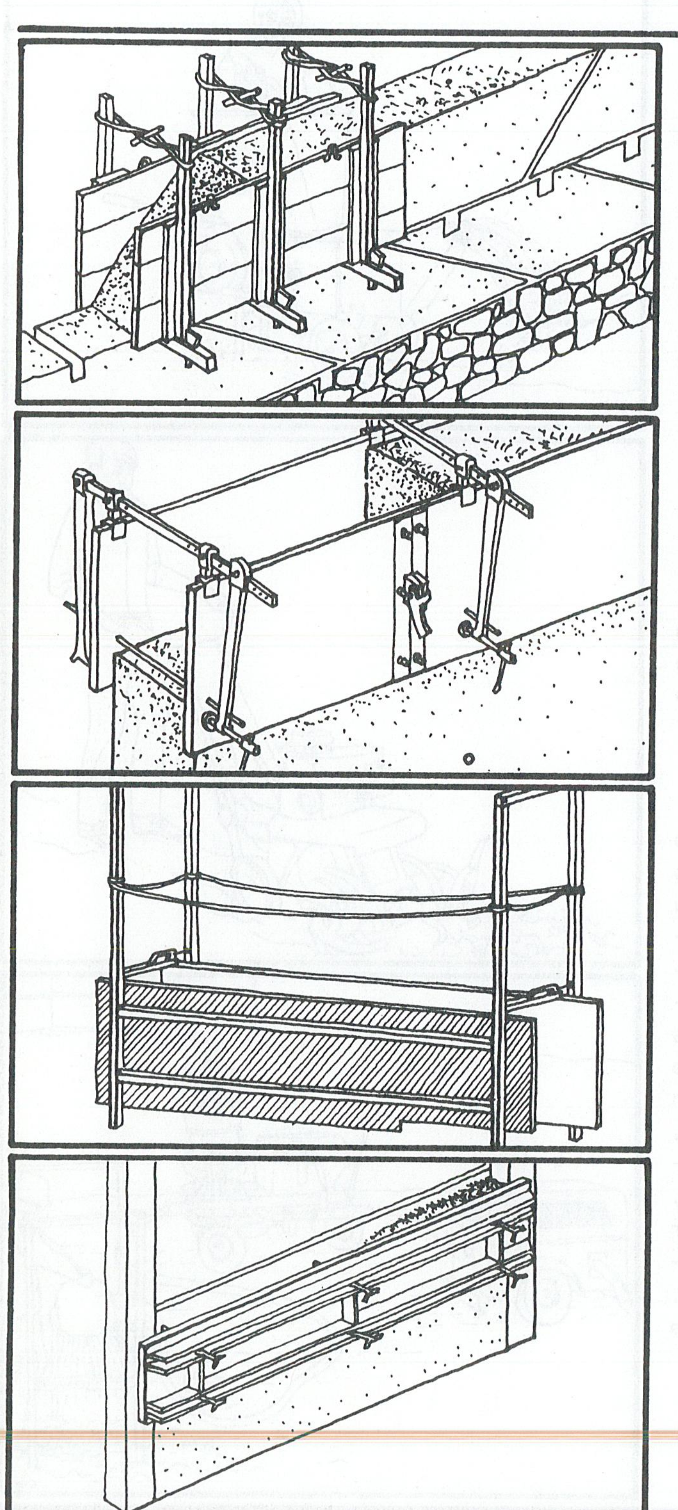


5 - TRANSPORT DE LA TERRE

C'est l'un des problèmes majeurs de la technologie du pisé. Ce sont en effet des quantités énormes de terre qui sont mises en oeuvre. Le matériau doit être transporté horizontalement, de la carrière au chantier et verticalement, au fur et à mesure de l'élévation de la construction. Traditionnellement, les piseurs sont aidés de manoeuvres qui portent la terre à l'aide de paniers ou de couffins, ou autres récipients, et l'élèvent en grimpant à l'échelle ou sur des échaffaudages. Ce travail peut également se faire à l'aide d'engins élévateurs qui sont très efficaces. De même, on a pu adapter des projeteurs d'enduits à air pulsé. Cette adaptation est délicate car le matériau n'est pas liquide. Par un poste central, on peut ainsi distribuer la terre dans un diamètre de 40 à 50 m jusqu'à 10 m de hauteur.



Le pisé exige l'emploi de coffrages adaptés qui ne sont plus ou pas disponibles à ce jour sur le marché. L'expérience établit que la petite taille et la simplicité de conception garantissent l'efficacité. Quels sont les paramètres d'un bon choix ? Solidité et stabilité pour résister aux pressions et aux vibrations du damage (minimum 300 daN/ m²). Maniabilité, c'est à dire légèreté et facilité de montage et de démontage - aplomb, calage et serrage. Efficacité et sécurité du travail avec possibilité d'adapter des échafaudages. Enfin et surtout: parfaite modulation de la dimension des murs en hauteur, longueur et épaisseur; le calepinage garantit pour beaucoup la rentabilité du pisé. Tout matériau peut être employé : bois (Maroc), rondins (Chine), aluminium (France), acier (Algérie), fibre de verre.



MAINTIEN DES COFFRAGES

Une fois dressés et mis en place, les coffrages doivent être maintenus solidement et être stable. Divers systèmes ont été élaborés par les constructeurs.

1 - CLEFS MASSIVES ET GROS TROUS

Ce sont de solides traverses, de section minimale égale à celle d'un chevron de charpente, sur lesquelles reposent les panneaux du coffrage. Le système est traditionnellement employé en de nombreux pays:Pérou, Maroc... L'emploi de ce type de clefs laisse apparaître de gros trous dans le pisé lors du déplacement des banches. Les clefs doivent de préférence être de forme légèrement conique pour pouvoir être facilement extraites sans détériorer le pisé. Elles peuvent être débordantes pour permettre la pose de planches servant d'échafaudage. Ce matériel est assez lourd et périssable : coups de masse sur les clefs pour les extraire.

2 - PETITES CLEFS ET PETITS TROUS

Ce système est hérité de la technologie du coffrage béton. Les clefs de banche sont des tiges d'acier filetées, des fers à béton ou des fers plats. Ce principe ne laisse apparaître que des petits trous au décoffrage et permet un rebouchage et un ragréage facile du pisé. Les fers doivent être de section suffisante pour porter les banches et ne pas cisailler le pisé. Un gainage dans des sections de tube plastique résoud ce problème.

3 - SANS CLEFS ET SANS TROUS

C'est le principe de maintien des coffrages dont rêvent tous les constructeurs. Deux solutions ont été retenues par les concepteurs.

- 1 - COFFRAGE INDEPENDANT PINCE : les panneaux sont maintenus par des systèmes de tendeurs ou de pinces à vis ou encore de verrins hydrauliques de serrage.

- 2 - COFFRAGE PINCE SUR POTEAUX : les poteaux ne doivent pas être trop distants pour éviter le risque de ventre du mur. Ce système est abondamment utilisé par le Ceped du Brésil.

ORGANISATION DES COFFRAGES

L'organisation du chantier, matériel et main-d'oeuvre disponibles, les délais d'exécution et les rendements souhaités, les plans d'architecte, le type de finition recherché, peuvent fortement influencer le choix d'un principe de coffrage et la conception du matériel.

1 - COFFRAGES EN PETITS ELEMENTS

- 1 - PROGRESSION HORIZONTALE : Ce principe est classiquement employé dans la tradition du pisé. Les systèmes de banches inventés par les artisans sont très divers et adoptent les principes de maintien précédemment évoqués. La légèreté et la maniabilité de matériel, la modulation très flexible en sont un atout majeur.

- 2 - PROGRESSION VERTICALE : Ce principe est surtout adapté à la construction de murs en pisé en trumeaux. L'exécution du bâtiment en est facilitée et assez rapide mais les coffrages doivent être bien conçus. Les éléments verticaux de maintien des banches peuvent être des fonds de banches, des poteaux de structure ou des portiques extérieurs.

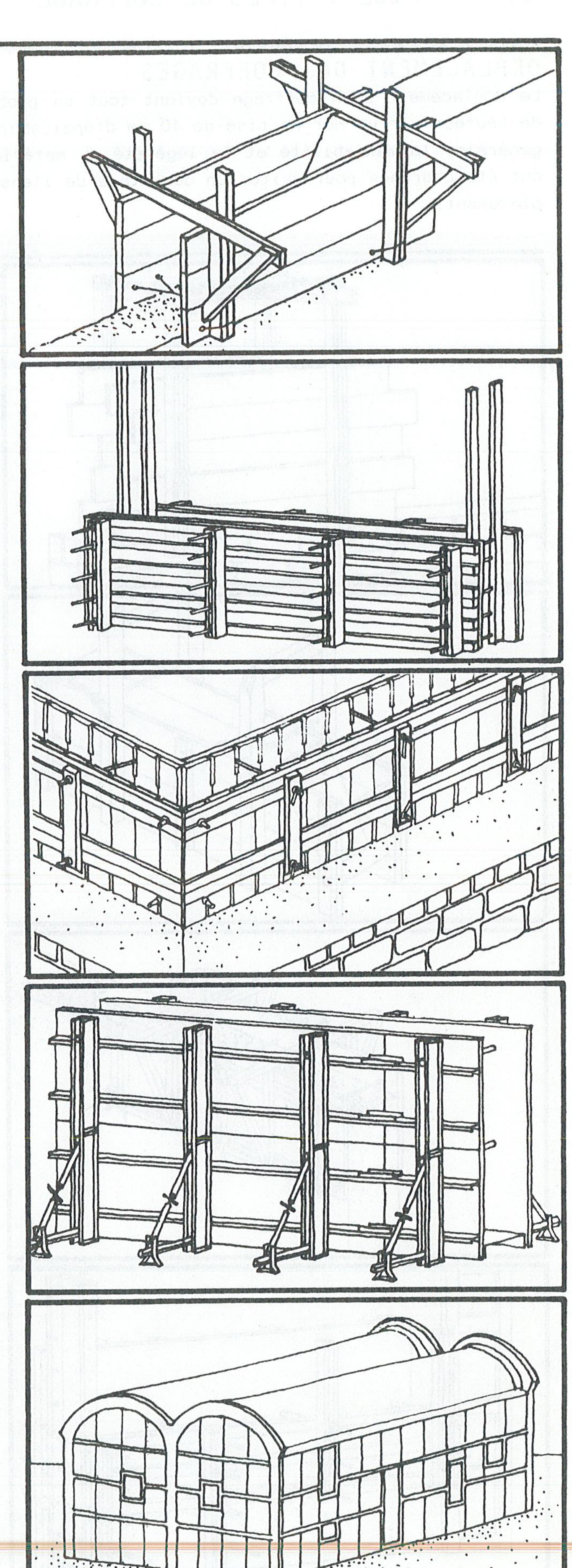
2 - COFFRAGES INTEGRAUX

Cette option du coffrage intégral, totalement inspirée de la technologie du béton doit être envisagée avec beaucoup de circonspection. La plupart des tentatives de travail dans ce sens ont été assez décevantes quant aux rendements. La fiabilité de ce principe est étroitement dépendante de la conception architecturale : dimensions modulaires, murs pleins à baies indépendantes, plans de grande simplicité, etc ...

- 1 - INTEGRAL HORIZONTAL : Une ceinture de coffrages intégraux, horizontale est déplacée verticalement dans sa totalité. La légèreté de matériel, la facilité et la rapidité de montage et de démontage sont indispensables. Les problèmes principaux sont les connexions entre les panneaux, l'horizontalité et le maintien de l'aplomb.

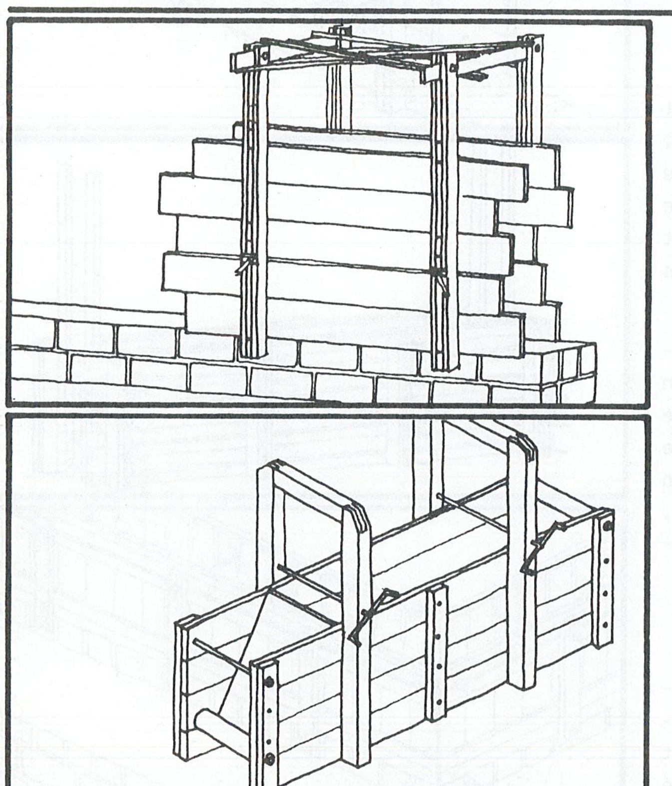
- 2 - INTEGRAL VERTICAL : Ce type de coffrages est plutôt adapté à la construction de murs trumeaux de grandes dimensions coffrés en toute hauteur. Afin de faciliter le damage, on n'érige qu'une face entièrement et la deuxième au fur et à mesure que l'on monte avec le mur.

- 3 - INTEGRAL - INTEGRAL : Le bâtiment est coffré en entier, d'un seul coup. Ce principe a été adopté au Maroc p.e. dans le projet BTS 67. Les projets doivent être de petite taille et simples et l'accès dans le coffrage aisé.



DEPLACEMENT DES COFFRAGES

Le déplacement d'un coffrage devient tout un problème pour les ouvriers quand ils sont juchés à 7 m de hauteur sur un mur en pisé de 40 cm d'épaisseur. La sécurité du travail est primordiale. En règle générale, la maniabilité et la légèreté du matériel aident à assurer une bonne sécurité. Des moyens ont été cherchés pour éviter un démontage de l'ensemble du matériel et un remontage intégral après déplacement.

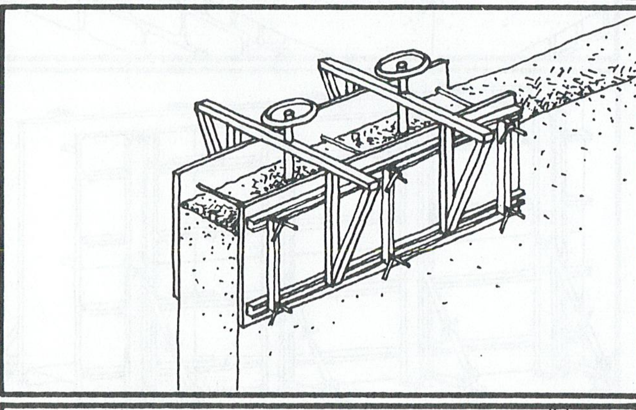


1 - COFFRAGES A PORTIQUE

Le principe est préférentiellement adapté à la construction de panneaux de murs en trumeaux. Les coffrages sont légers, de simples planches, panneaux de contre-plaqué ou même de rondins, qui sont maintenus par des potences en bois fichées dans le sol et serrées en haut : le principe du pisé chinois est de ce type. Le G.H.K. de Kassel a réactualisé ce principe avec un système de portique articulé en bois et un serrage par tiges filetées.

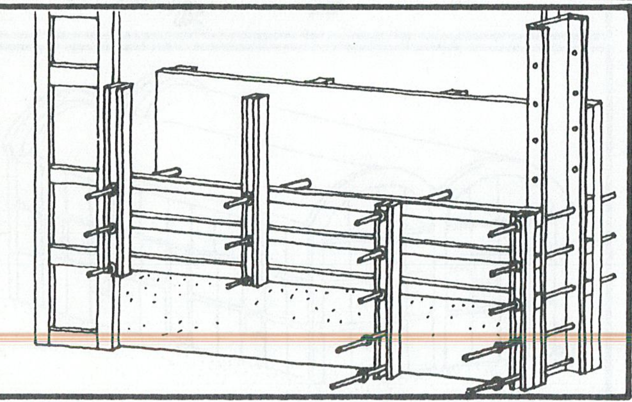
2 - COFFRAGES A ROULEAUX

Le principe d'une banche mobile à progression horizontale, grâce à des rouleaux, a été imaginé en Australie dès 1952, par G.F. Middleton. Ce système est adapté pour la construction de murs droits mais exige l'emploi d'éléments de coffrage fixes pour les baies, les angles de murs et les liaisons de murs de refend.



3 - COFFRAGES GLISSANTS

Différentes tentatives ont été faites pour adapter les systèmes de coffrages glissants pour béton. Jusqu'à présent, les propositions connues restent assez onéreuses mais fonctionnent assez bien.



4 - COFFRAGES SAUTEURS

La progression des coffrages est verticale par sauts successifs des panneaux. Le principe a été réactualisé par le Rammed Earth Institute International, Colorado, USA. Deux jeux de panneaux de coffrage sont nécessaires. Le panneau n° 1 passera en position 3 puis 5; le panneau 2 passera en position 4 puis 6. Ce système est assez performant mais ne résoud pas le problème des angles de murs et de leur liaison. L'avantage principal est que le panneau inférieur sert de support et de référence pour le suivant.

CONFIGURATIONS DES COFFRAGES

La plupart des coffrages connus, qu'ils soient en progression horizontale ou verticale, sont conçus sur le principe de panneaux droits qui donnent des surfaces planes. Différentes recherches ont été menées pour échapper à cette seule configuration.

1 - SURFACES PLANES ET DROITES

C'est la configuration la plus fréquente, autant employée dans la construction traditionnelle en pisé que contemporaine, quels que soient les coffrages. Le principe est simple et n'exige pas une problématique très élaborée.



2 - FRUIT SUR MUR

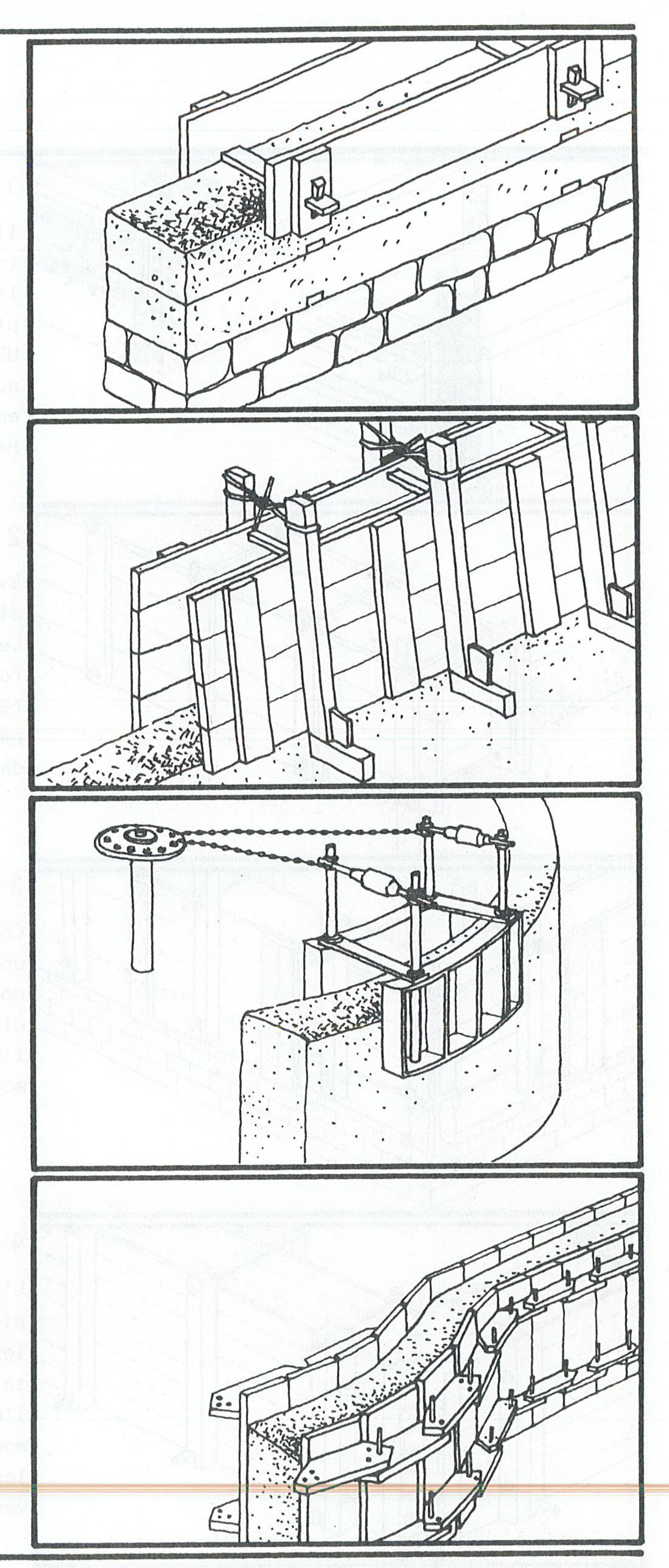
Ces coffrages peuvent produire des surfaces planes droites ou des surfaces planes inclinées autrement nommées "fruit du mur". L'inclinaison est progressive au fur et à mesure de l'élévation du mur, vers le centre du mur. Le fruit peut être sur la seule face extérieure du mur ou sur les 2 faces et de simples cales et coins en bois appelés "fixe fruits" permettent cette configuration. Ce fruit allège la masse du mur en montant.

3 - SURFACES COURBES

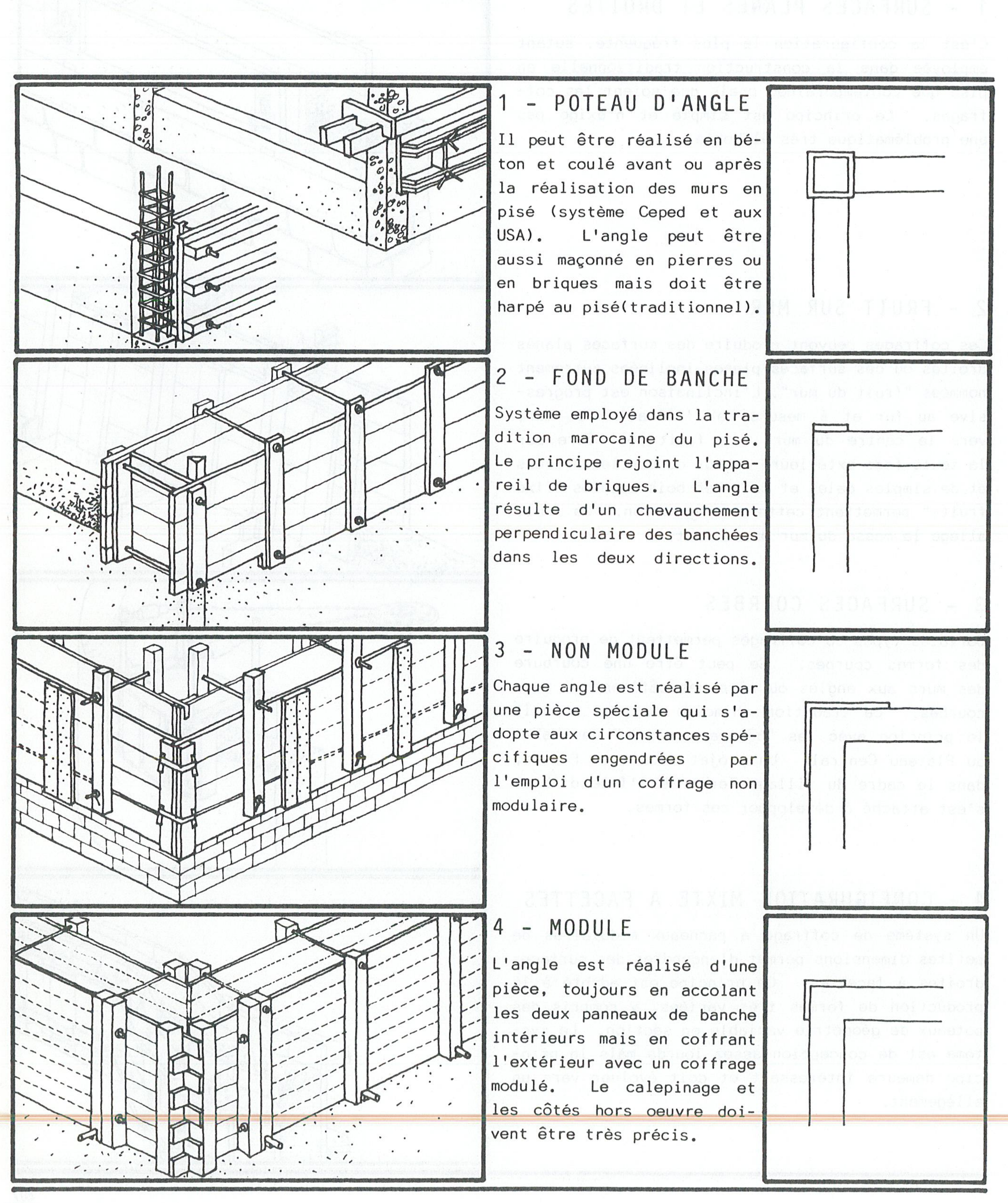
Certains types de coffrages permettent de produire des formes courbes. Ce peut être une courbure des murs aux angles ou même des bâtiments à murs courbes. La tradition chinoise du pisé connaît le principe avec les "bâtiments ronds" des Hakka du Plateau Central. Un projet récent en France, dans le cadre du village Terre de l'Isle d'Abeau s'est attaché à développer ces formes.

4 - CONFIGURATION MIXTE A FACETTES

Un système de coffrage à panneaux modulaires de petites dimensions permet d'engendrer des surfaces droites à facettes. Ce principe est adapté à la production de formes très variées, y compris des poteaux de géométrie variable en section. Le système est de conception assez lourde mais le principe demeure intéressant et doit évoluer vers un allègement.



Les angles de mur en pisé exigent l'emploi de coffrages adaptés. La modulation prévue du coffrage pour les pans de murs droits peut être remise en question par un manque d'attention accordé au problème de l'angle. Les angles peuvent être réalisés d'une pièce ou par chevauchement alterné et perpendiculaire des banchées. On prévoiera la pose d'un chanfrein pour réduire l'érosion de l'angle extérieur. Les systèmes en "T", de liaison murs de refend adoptent les mêmes principes.



1 - POTEAU D'ANGLE

Il peut être réalisé en béton et coulé avant ou après la réalisation des murs en pisé (système Ceped et aux USA). L'angle peut être aussi maçonné en pierres ou en briques mais doit être harpé au pisé(traditionnel).

2 - FOND DE BANCHE

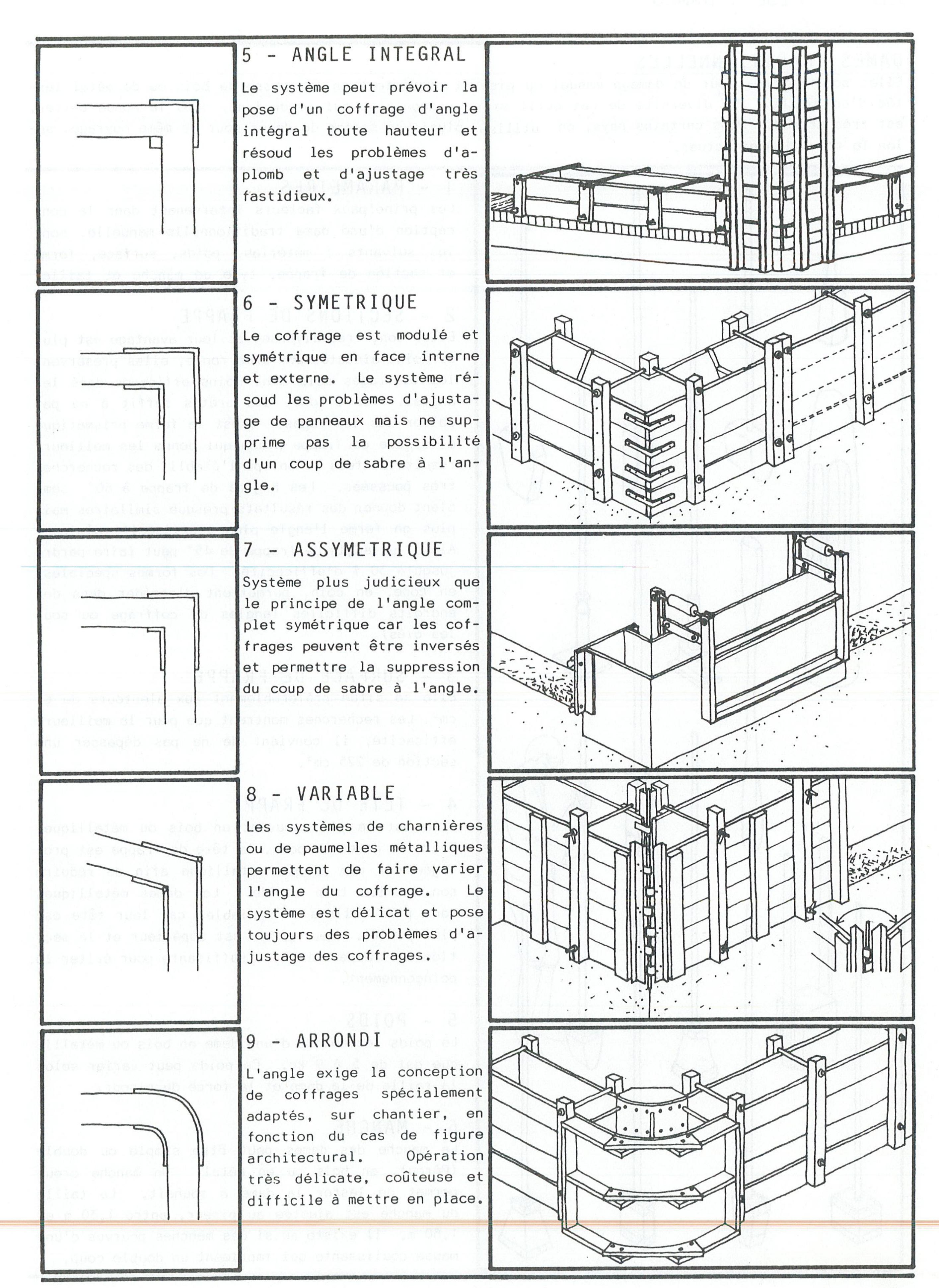
Système employé dans la tradition marocaine du pisé. Le principe rejoint l'appareil de briques. L'angle résulte d'un chevauchement perpendiculaire des banchées dans les deux directions.

3 - NON MODULE

Chaque angle est réalisé par une pièce spéciale qui s'adopte aux circonstances spécifiques engendrées par l'emploi d'un coffrage non modulaire.

4 - MODULE

L'angle est réalisé d'une pièce, toujours en accolant les deux panneaux de banche intérieurs mais en coffrant l'extérieur avec un coffrage modulé. Le calepinage et les côtés hors oeuvre doivent être très précis.



5 - ANGLE INTEGRAL

Le système peut prévoir la pose d'un coffrage d'angle intégral toute hauteur et résoud les problèmes d'aplomb et d'ajustage très fastidieux.

6 - SYMETRIQUE

Le coffrage est modulé et symétrique en face interne et externe. Le système résoud les problèmes d'ajustage de panneaux mais ne supprime pas la possibilité d'un coup de sabre à l'angle.

7 - ASSYMETRIQUE

Système plus judicieux que le principe de l'angle complet symétrique car les coffrages peuvent être inversés et permettre la suppression du coup de sabre à l'angle.

8 - VARIABLE

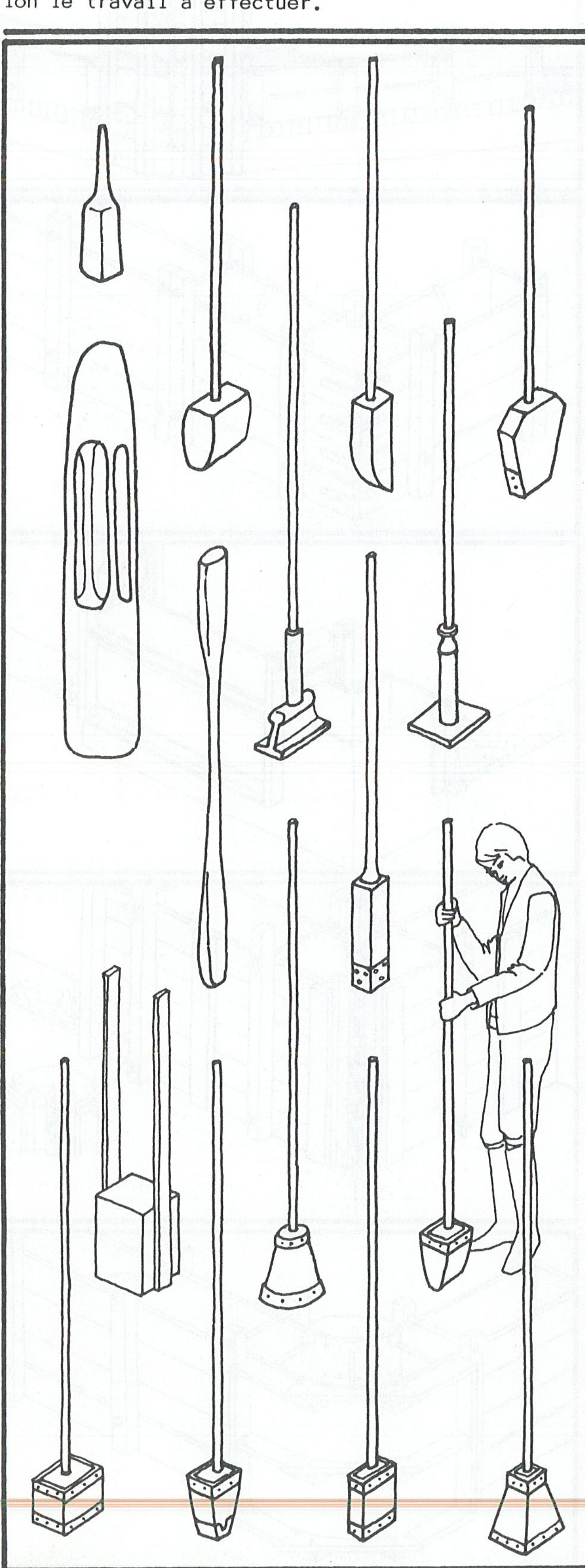
Les systèmes de charnières ou de paumelles métalliques permettent de faire varier l'angle du coffrage. Le système est délicat et pose toujours des problèmes d'ajustage des coffrages.

9 - ARRONDI

L'angle exige la conception de coffrages spécialement adaptés, sur chantier, en fonction du cas de figure architectural. Opération très délicate, coûteuse et difficile à mettre en place.

DAMES TRADITIONNELLES

Elles sont conçues pour un damage manuel du pisé et consistent en une masse de bois ou de métal lestée d'un manche. La diversité de cet outil et du vocabulaire qui le désigne, dans le monde entier, est très grande. Dans certains pays, on utilise plusieurs sortes de dames pour le même ouvrage, selon le travail à effectuer.



1 - PARAMETRES

Les principaux facteurs intervenant dans la conception d'une dame traditionnelle manuelle, sont les suivants : matériau, poids, surface, forme et section de frappe, type de manche et taille.

2 - SECTIONS DE FRAPPE

Elles sont très diverses et leur avantage est plus ou moins discuté. De forme ronde, elles préservent les coffrages mais sont moins efficaces dans les angles. Un arrondi des arêtes suffit à ne pas abîmer les coffrages. C'est la forme prismatique à surface de frappe plane qui donne les meilleurs résultats, tels qu'ont pu l'établir des recherches très poussées. Les angles de frappe à 60° semblent donner des résultats presque similaires mais plus on ferme l'angle plus l'efficacité diminue. Ainsi, un angle de frappe de 45° peut faire perdre jusqu'à 30 % d'efficacité. Des formes spéciales, en cône, en coin, permettent d'accéder dans des endroits difficiles (angles de coffrage ou sous les clés).

3 - SURFACE DE FRAPPE

Elle se situe préférablement aux alentours de 64 cm². Les recherches montrent que pour la meilleure efficacité, il convient de ne pas dépasser une section de 225 cm².

4 - TETE DE FRAPPE

Elle est le plus souvent en bois ou métallique. Pour les dames en bois, la tête de frappe est protégée par une plaque métallique afin de réduire son érosion trop rapide. Les dames métalliques sont plus solides et maniables car leur tête est plus petite. Leur poids est supérieur et la section de frappe doit être suffisante pour éviter le poinçonnement.

5 - POIDS

Le poids recommandé d'une dame en bois ou métallique est de 5 à 9 kg. Ce poids peut varier selon la taille de la dame et la force du piseur.

6 - MANCHE

Le manche des dames peut être simple ou double (Pérou), en bois ou en métal. Un manche creux permet de lester la dame à souhait. La taille du manche est ajustée au piseur, entre 1,30 m et 1,60 m. Il existe aussi des manches pourvus d'une masse coulissante qui impriment un double coup.

Le damage est une tâche lente et fastidieuse, fatigante mais qui est facilité par la cadence du travail. On a parfois recours à une mécanisation. Les engins sont divers et pour la plupart lourds; ils exercent de fortes poussées sur les banches qui doivent pouvoir résister. Chaque engin a une énergie de compactage variable qui dépend du rapport entre le nombre de passes, la vitesse de passage et l'épaisseur des couches de tere foisonnée à compacter qui modifie le gradient de compacité. Les coûts sont très variables de 350 à 1 500 US $.

1 - DAMAGE PAR IMPACT

- 1 - **FOULOIRS PNEUMATIQUES** : Ils sont directement hérités de l'industrie de la fonderie où ils servent à tasser le sable dans les moules. Leur mode de travail imite celui d'une dame manuelle mais avec une plus grande fréquence d'impacts (jusqu'à 700 coups/minute). Seuls les fouloirs de "sol" sont intéressants et le marché en abonde (Atlas Copco, Ingersoll-Rand, Perret, etc ...). Les fouloirs pneumatiques ne doivent pas être trop lourds (15 kg maxi) ni trop puissants car ils peuvent déstabiliser les coffrages et foiçonner le pisé. Leur course doit être longue, d'environ 20 cm et l'alimentation en air modérée. La pression doit atteindre 5 daN/cm², guère plus. Les compresseurs demeurent très chers (environ 5 000 US $). Néanmoins, un damage au fouloir pneumatique est très efficace et donne, avec de bonnes terres, d'excellents pisés.

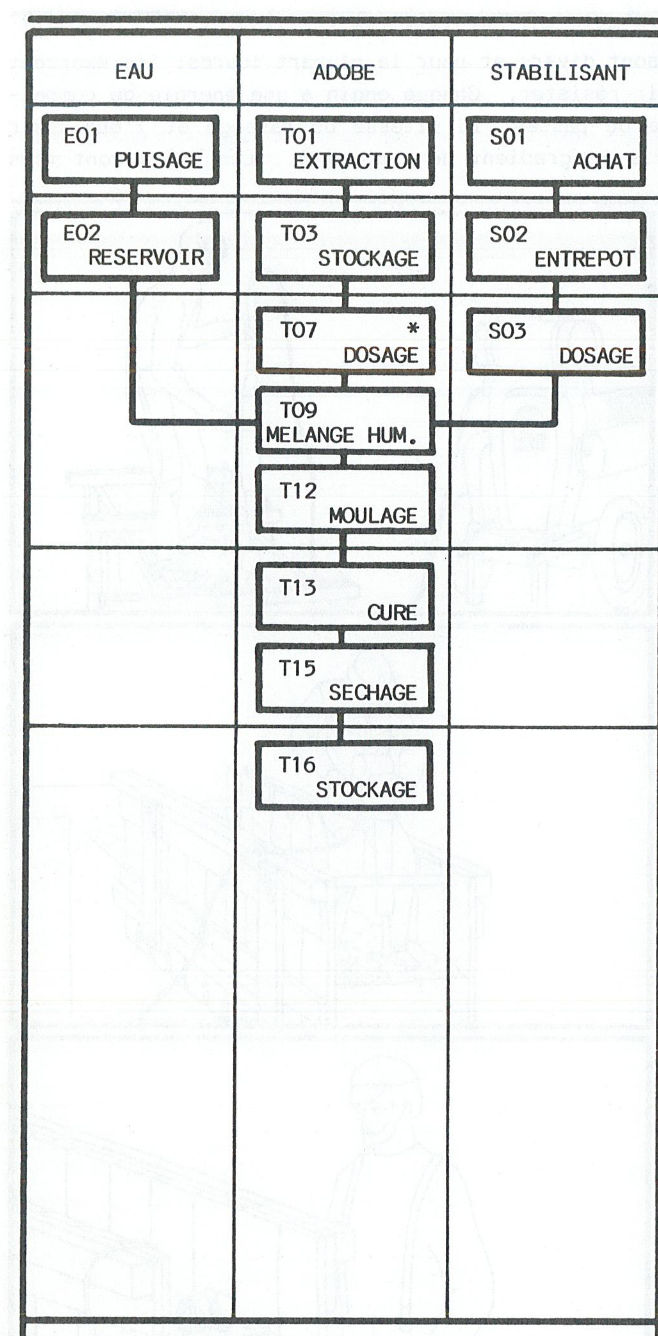
- 2 - **MARTEAUX PIQUEURS** : L'idée de transformer un marteau piqueur en lui adaptant une plaque de damage a été tentée. Ces engins demeurent trop puissants et peuvent faire entrer les murs en résonnance, causant un délitage du matériau.

2 - DAMAGE PAR VIBRATION

- 1 - **PLAQUES VIBRANTES** : Le système a été mis au point par le G.H.K. de Kassel : un moteur électrique à masse rotative excentrée imprime des vibrations à la plaque et met l'engin en mouvement. Un interrupteur permet de choisir le sens de marche de l'engin qui fonctionne automatiquement. Le rapport entre le poids de l'engin, la vitesse de passage et la fréquence de vibration est difficile à affiner.

- 2 - **DAMES VIBRANTES** : Les modèles existent en version motorisée thermique ou électrique. Ces engins demeurent très lourds, encombrants et coûteux. Leur emploi qui a fait l'objet de plusieurs tentatives peu démonstratives est à déconseiller.





NOTES

- Le schéma de production précédent décrit la fabrication manuelle classique de briques d'adobe stabilisées au bitume (émulsions, cut-backs).

* Certaines opérations sont rendues nécessaires par la stabilisation.

1 - PRODUCTION

La production des briques d'adobe décrit des modes parmi les plus simples pour la production de matériaux de construction. L'histoire, la géographie et les techniques de production de l'adobe exposent un très large registre de variantes. Ainsi, les schémas de production, décrits en détail, pourraient être multipliés à l'infini.

Les adobes peuvent être produites à partir d'une terre liquide ou d'une terre plastique, sans ou avec moules de conception très diverse. L'état plastique permet aussi une production par extrusion.

Au terme du procédé de production, contrairement aux blocs comprimés et au pisé, l'adobe est un produit maléable et fragile. Un séchage individuel de chaque brique est nécessaire : l'ensemble de l'aire de production est donc très vaste.

S'il y a mécanisation, souvent le premier poste visé sera l'extraction. Vient ensuite le malaxage puis le moulage en dernier lieu.

2 - PRODUITS

Les formes des adobes sont multiples mais le catalogue est beaucoup moins étendu que celui des blocs compressés. La technique de production impose des formes massives.

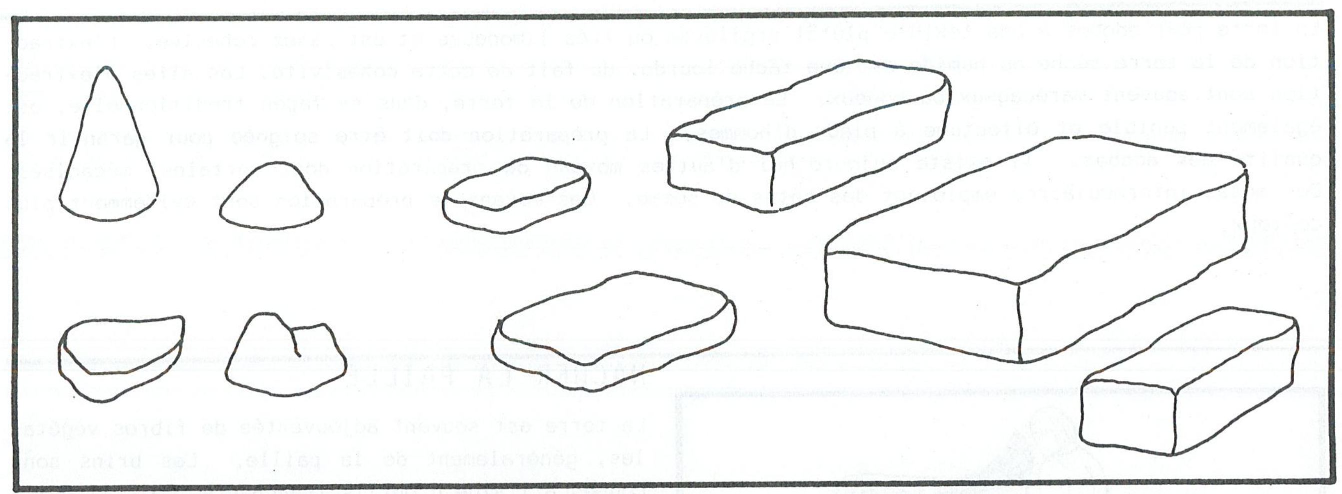
3 - PERIODES DE PRODUCTION

Chaque technique et chaque région du monde décrit des contraintes propres de production. Le séchage des adobes, très dépendant des faveurs du climat, est la contrainte majeure. Ainsi la production des adobes cesse pendant les périodes froides et parfois lorsque la chaleur est extrême. Beaucoup de briqueteries sont installées sur des terrasses fluviales et exploitent le matériau déposé par les crues. Cet apport de terre peut être contraignant lorsque les crues exigent de dégager périodiquement l'aire de production.

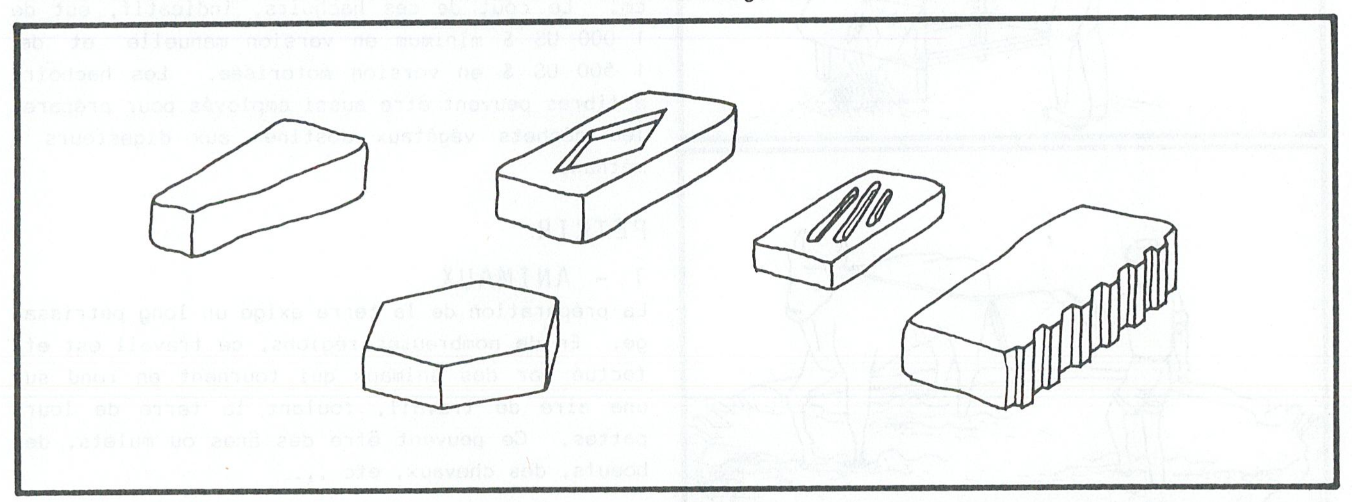
4 - EQUIPES ET RENDEMENTS

La taille des équipes, ainsi que leur rendement est variable à l'extrême. Les rendements suivants couvrent toutes les opérations y compris extraction et stockage.

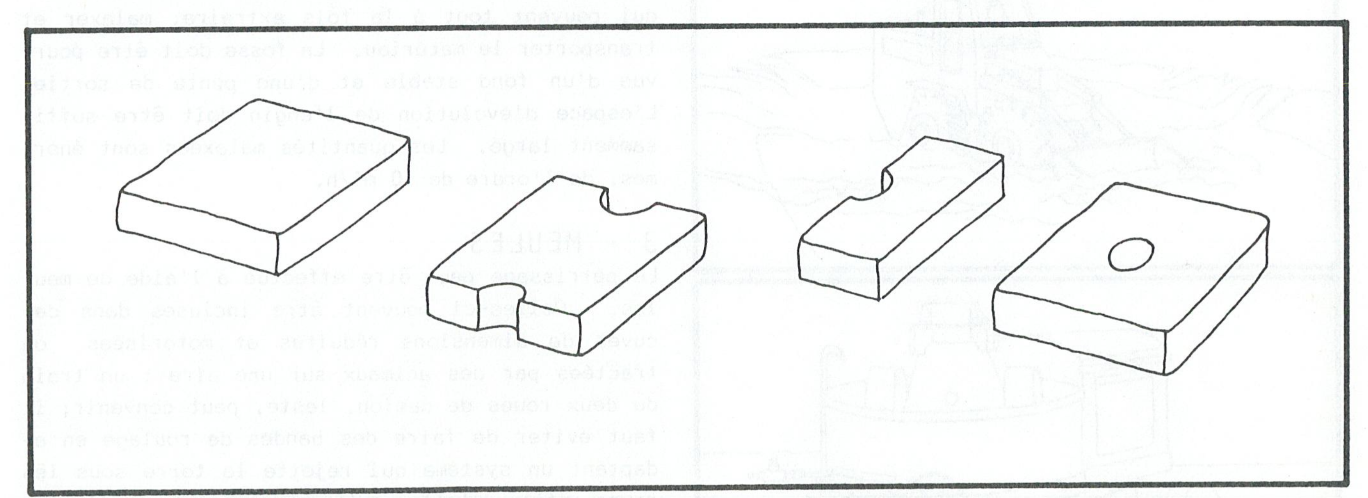
	P/JOUR	OUVRIERS	COUT-US $
MECANISE	20 000	5 - 6	300 000
SEMI-MECANISE	10 000	5 - 6	50 000
MANUEL-EPROUVE	2 500	4 - 5	0
MANUEL-DEPRECIE	500	4 - 5	0



BRIQUES D'ADOBE CLASSIQUES : Elles peuvent être façonnées à la main, sans moule; leur forme est variée, conique ou cylindrique, piriforme ou cubique. Elles peuvent être moulées dans des formes en bois ou mécaniquement; leur forme est alors prismatique, cubes ou parallélépipèdes et leurs dimensions très variables avec des tailles allant de 25 cm à 60 cm de long.

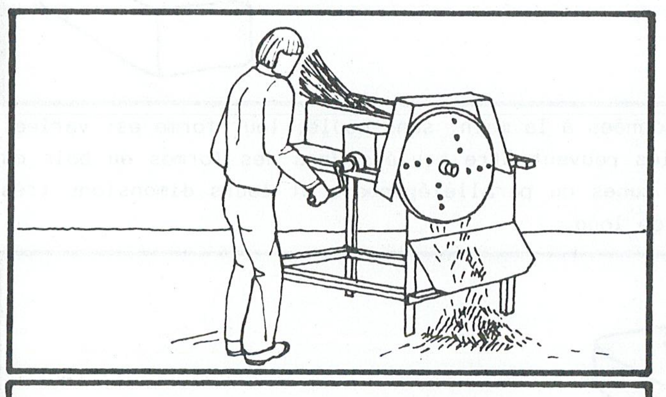


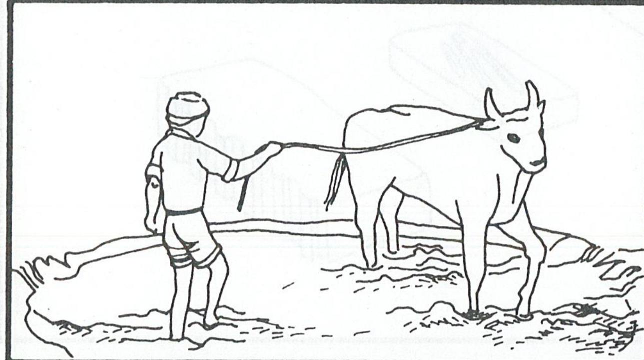
BRIQUES D'ADOBE SPECIALES : Elles peuvent être destinées à un emploi classique ou extraordinaire et spécialement créées pour cette occasion. Ce sont par exemple des adobes à griffes pour améliorer leur adhérence (coupoles, voûtes), des adobes à emboîtement ou des adobes décorées, signées, etc ...

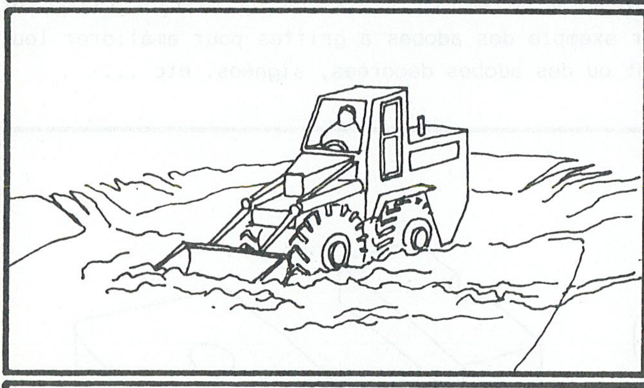


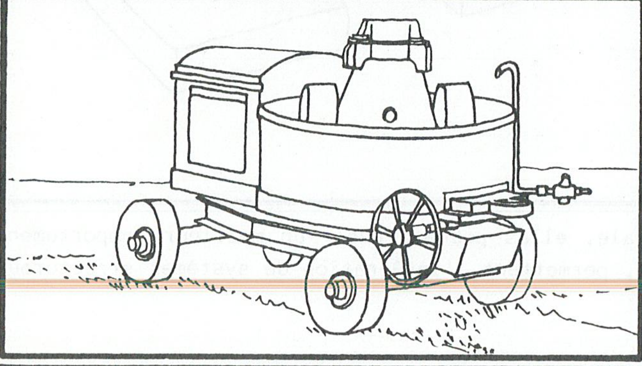
BRIQUES D'ADOBE ANTISISMIQUES : par leur forme spéciale, elles peuvent avoir un meilleur comportement antisismique. D'autres, par leur conception adaptée, permettent l'intégration de systèmes structuraux antisismiques (chaînages p.e.).

La terre pour adobes a une texture plutôt argileuse ou très limoneuse et est assez cohésive. L'extraction de la terre sèche ou humide est une tâche lourde, du fait de cette cohésivité. Les sites d'extraction sont souvent marécageux ou boueux. La préparation de la terre, dans sa façon traditionnelle, est également pénible et effectuée à pieds d'hommes. La préparation doit être soignée pour garantir la qualité des adobes. Il existe aujourd'hui d'autres moyens de préparation dont certains mécanisés. Des modes intermédiaires emploient des bêtes de somme. Ces moyens de préparation sont évidemment plus coûteux.









HACHER LA PAILLE

La terre est souvent adjouventée de fibres végétales, généralement de la paille. Les brins sont coupés à l'aide d'outils tranchants. Mais il existe sur le marché des hachoirs à paille, manuels ou motorisés,qui peuvent débiter de grosses quantités de paille ou d'autres fibres en brins de 1 à 30 cm. Le coût de ces hachoirs, indicatif, est de 1 000 US $ minimum en version manuelle et de 1 500 US $ en version motorisée. Les hachoirs à fibres peuvent être aussi employés pour préparer les déchets végétaux destinés aux digesteurs à méthane.

PETRIR

1 - ANIMAUX

La préparation de la terre exige un long pétrissage. En de nombreuses régions, ce travail est effectué par des animaux qui tournent en rond sur une aire de travail, foulant la terre de leurs pattes. Ce peuvent être des ânes ou mulets, des boeufs, des chevaux, etc ...

2 - ENGINS

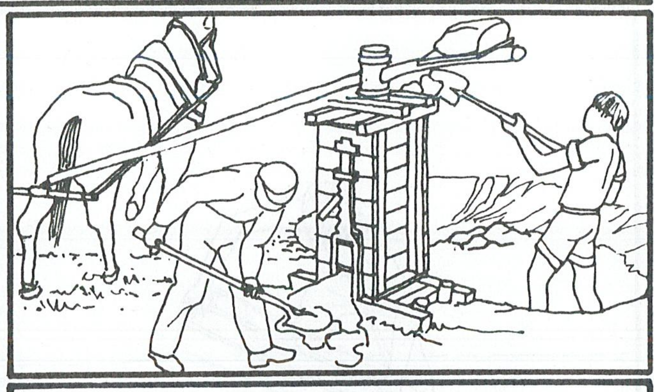
Le matériau peut être pétri dans une fosse à l'aide d'engins : pelle excavatrice, tracteur, etc ... qui peuvent tout à la fois extraire, malaxer et transporter le matériau. La fosse doit être pourvue d'un fond stable et d'une pente de sortie. L'espace d'évolution de l'engin doit être suffisamment large. Les quantités malaxées sont énormes, de l'ordre de 10 m³/h.

3 - MEULES

Le pétrissage peut être effectué à l'aide de meules. Celles-ci peuvent être incluses dans des cuves de dimensions réduites et motorisées ou tractées par des animaux sur une aire : un train de deux roues de camion, lesté, peut convenir; il faut éviter de faire des bandes de roulage en adaptant un système qui rejette la terre sous les roues afin qu'elle soit constamment triturée. Les systèmes à meules improvisés ne coûtent que quelques US $ et les malaxeurs à moules de l'ordre de 2 000 US $; ce type de matériel est très lourd et les débits classiques sont d'environ 7 m³/jour.

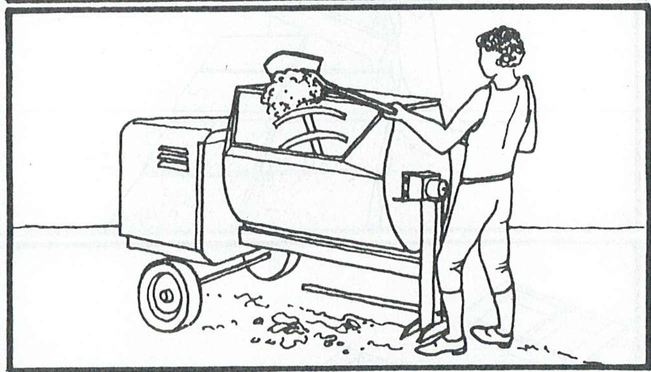
MALAXER

1 - MALAXEUR VERTICAL



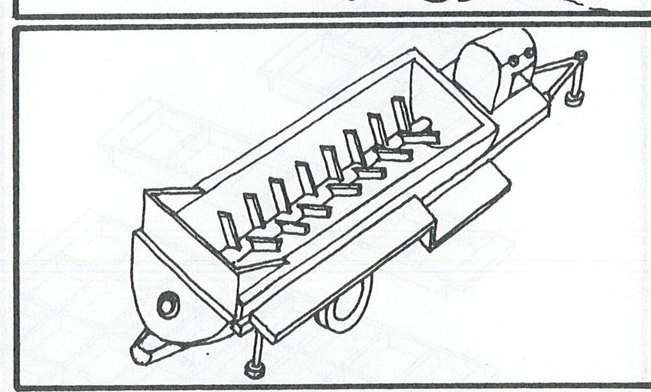
Les plus courants sont construits avec des moyens rudimentaires : quelques planches et poutres, cordes, fils de fer, etc ... Le malaxeur peut être actionné par un animal : le levier doit avoir au moins 2,5 m de long et l'animal ne pas travailler plus que 5 h/jour. Il existe aussi des malaxeurs verticaux mécaniques qui coûtent à partir de 2 000 US $. Leur construction doit être très solide. Les débits classiques sont de 10 m³/jour.

2 - MALAXEUR A ENDUIT



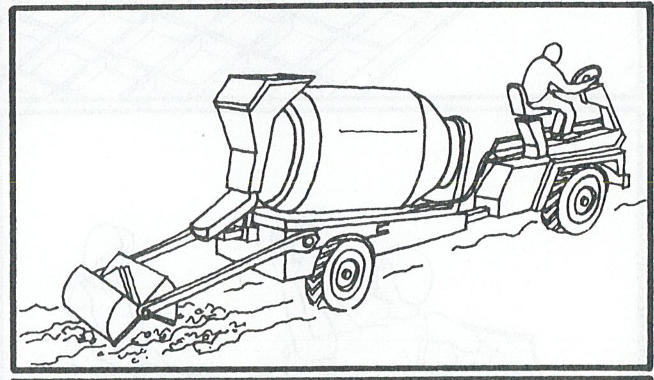
Avec ces malaxeurs, il faut plutôt travailler du côté liquide que du côté plastique car ils ne sont pas très solides. Le débit quotidien de ce genre de malaxeur est d'environ 8 m³/jour. Le coût se situe à partir de 1 500 US $.

3 - MALAXEUR LINEAIRE



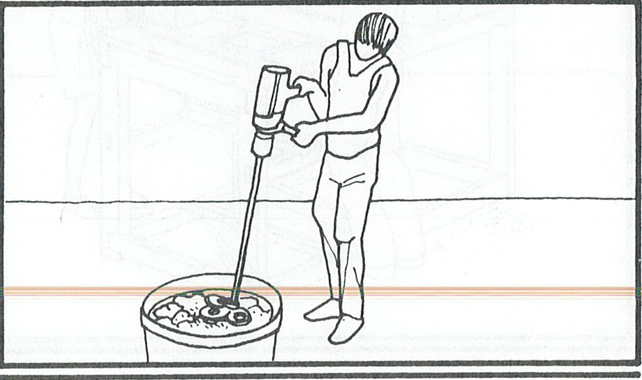
Ils sont couramment employés dans des unités de production à moyen et grand débit. De nombreuses variantes existent : à axe simple ou double, en travail discontinu ou continu. Ils peuvent être de construction lourde ou légère. Les débits sont très importants et la terre boueuse peut être déversée dans une fosse d'attente. Les plus petits malaxeurs linéaires coûtent environ 1 500 US $ et leur débit est de 4 à 5 m³/jour. Les grands malaxeurs hérités de l'industrie céramique peuvent coûter plus de 10 000 US $ et débitent plus de 50 m³/jour.

4 - BETONNIERE



Bien que peu conseillée, les bétonnières classiques à béton, à cuve inclinée, peuvent convenir. Leur rendement est faible et le mélange peu homogène, souvent grumeleux. L'avantage principal est la grande variété des modèles: petits à grands, adaptables à une prise de force de tracteur, camions toupies et engins spéciaux sur roues.

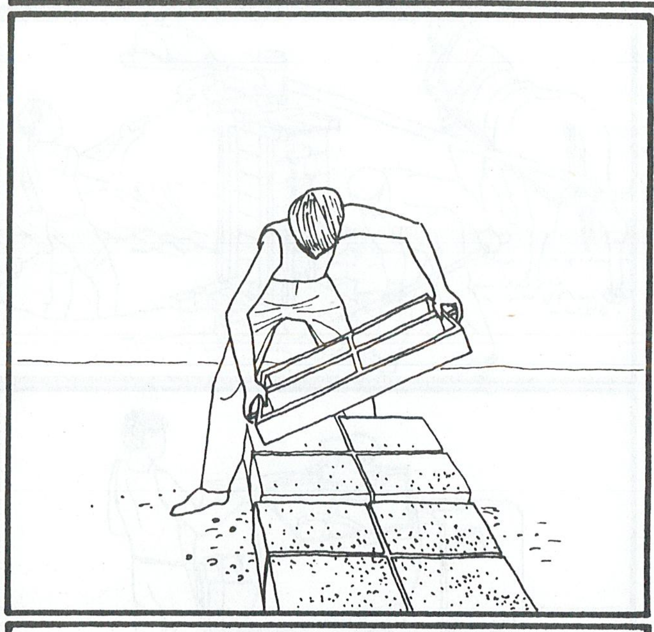
5 - HELICE

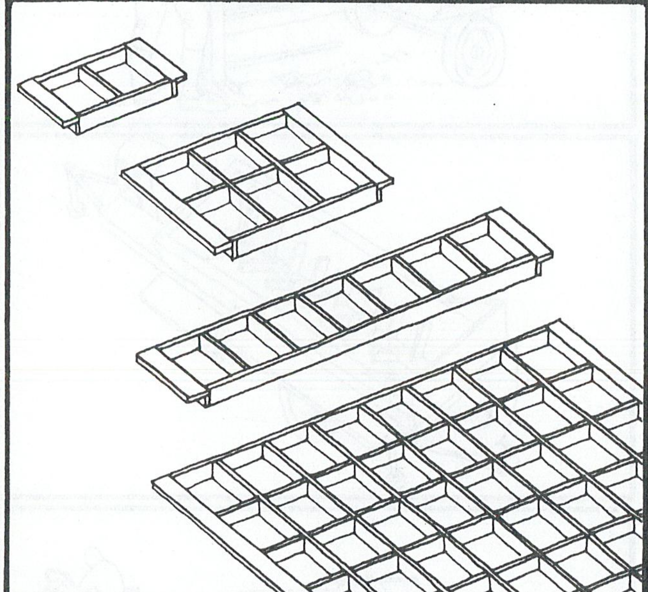


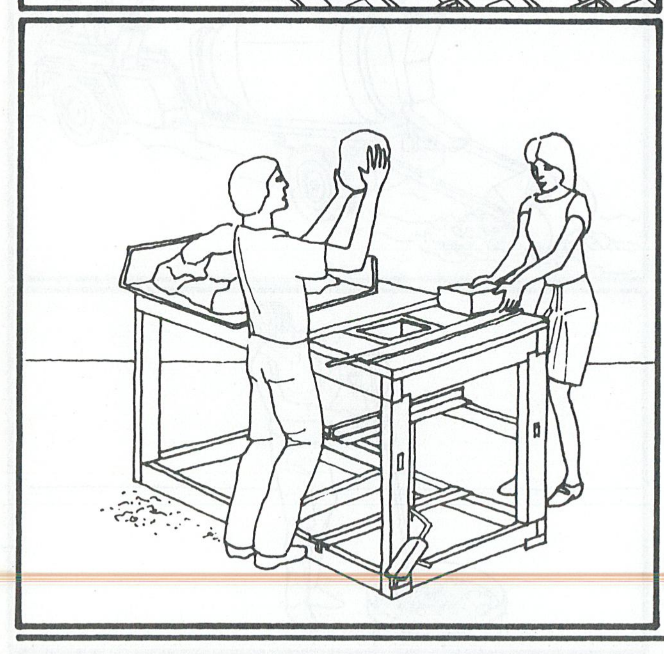
Il est également possible de travailler en petites quantités à l'aide de cuves munies d'une hélice du type de celles employées en peinture ou en gypserie. Il est ainsi possible de préparer 50 litres de mélange en 10 minutes par gâchées successives. Il s'agit là d'une solution de fortune qui marche néanmoins très bien.

6 - MALAXEUR PLANETAIRE

Ce genre de malaxeur convient parfaitement pour la préparation de la boue, même si celle-ci doit être mélangée à des fibres végétales. Les plus petits avec un volume de gâchage de 100 litres coûtent dans les 3 000 US $ et ont un débit de 10 m³/jour.







PETITE ECHELLE

Il est possible de produire des adobes avec ou sans moule. On peut encore observer dans le monde des modes de production très primitifs en façonnage manuel. Les briques ainsi produites ne sont pas très belles et les murs construits peu solides. Il est préférable d'employer des moules de forme prismatique. Le moulage manuel réclame une terre pâteuse mi-ferme ou mi-molle.

1 - PATE MI-MOLLE

La pâte introduite dans le moule est légèrement travaillée à la main et l'on démoule aussitôt. Pour démouler facilement, le moule doit être propre et préalablement mouillé. Par cette technique du "coup d'eau", le film d'eau qui adhère au moule facilite le démoulage. Les moules ordinaires sont à compartiment unique, de toutes dimensions et jusqu'à 60 cm de long pour les adobes les plus lourdes. Ce peuvent être aussi des moules à compartiments multiples; jusqu'à 4 adobes simultanément moulées. Ces moules sont en bois ou en fer, il en existe même en plastique. Les briques présentent un retrait assez important et leur qualité doit être soignée.

2 - PATE MI-FERME

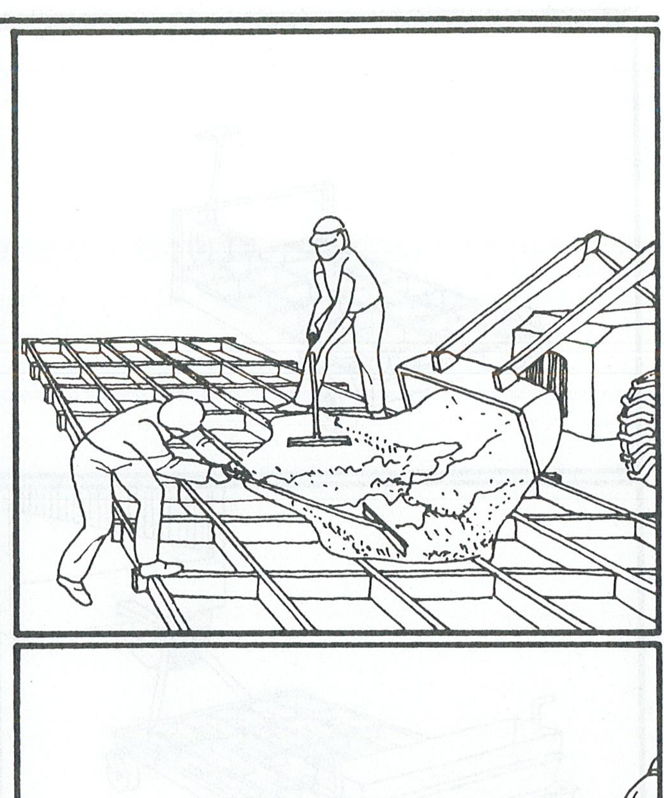
Pour obtenir des adobes de meilleure qualité, plus denses et plus résistantes, il est préférable de travailler avec une pâte mi-ferme. La technique est différente. Le moule doit être très propre, trempé dans l'eau et saupoudré de sable à l'intérieur. Pour cette technique du "coup de sable", une quantité de terre déterminée est grossièrement mise en forme de boule, roulée dans le sable, puis jetée avec force dans un moule à compartiment simple - pas de moule multiple. La boule est tassée au poing dans le moule en n'oubliant pas les coins et le surplus est enlevé avec une réglette de bois. Seule de la terre enrobée de sable doit adhérer aux parois du moule pour faciliter le démoulage. Les moules sont très divers, avec ou sans fond. L'adobe est démoulée sur l'aire de séchage. Cette technique oblige à stocker la terre près du moulage et l'on doit disposer de plusieurs moules. Il est préférable de travailler en hauteur, sur une table. Il existe même des tables à moule incorporé et levier d'éjection : l'adobe doit être transportée au séchage sur une planchette (fond de moule). ITDG commercialise ce type de tables (1 300 US $) et en diffuse les plans. Le rendement de moulage est de l'ordre de 500 adobes/jour.

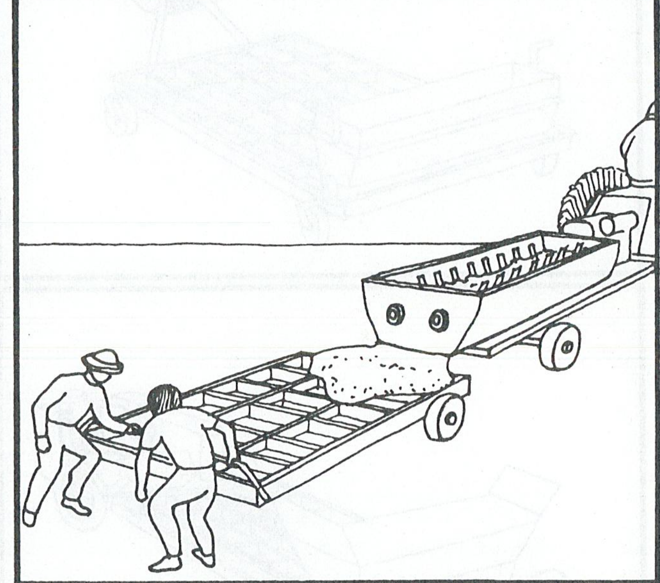
GRANDE ECHELLE

Pour un procès de production organisé,la technique change.

1 - MOULES MULTIPLES

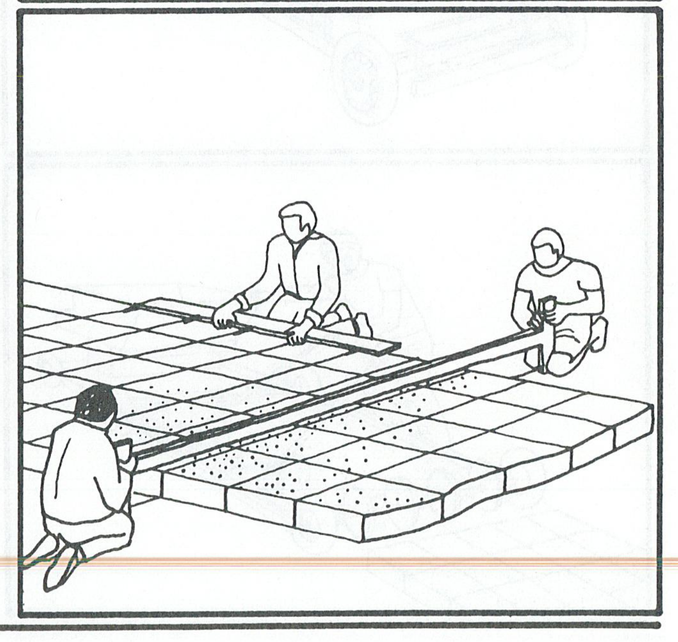
Ce peuvent être des moules du type échelles - qui seront juxtaposés - ou de grands moules parallélépipédiques. On peut ainsi produire de 10 à 25 adobes simultanément. La terre doit pouvoir remplir tout le moule d'elle-même; elle est donc plus liquide, à l'état de pâte molle. Si ce n'est ce changement d'état hydrique, la préparation en amont reste identique. La terre est donc déversée dans les moules, par brouette, à l'aide d'un dumper, d'un bulldozer à godet ou même directement depuis le malaxeur qui est alors mobile, tracté ou sur camion. La terre est égalisée avec une sorte de raclette qui permet de bien la répartir dans le moule, en tous coins. On peut attendre quelque temps avant de démouler mais le plus souvent, le démoulage est immédiat. L'opération est alors aussitôt recommencée. Les grands moules doivent être convenablement lavés, soit par trempage, soit par aspersion au jet sous pression; la propreté des moules et leur mouillage sont impératifs pour garantir la qualité des adobes. Les moules sont de préférence en bois ou en plastique plutôt qu'en fer, question de poids. Ils doivent être faciles à manipuler, à 2 personnes maximum. Le bois doit être dur et traité pour résister à l'eau afin d'éviter pourriture et déformation. Les rendements obtenus avec ce principe de moulage vont de 8 000 à 10 000 adobes/jour pour des équipes de 5 à 6 ouvriers.

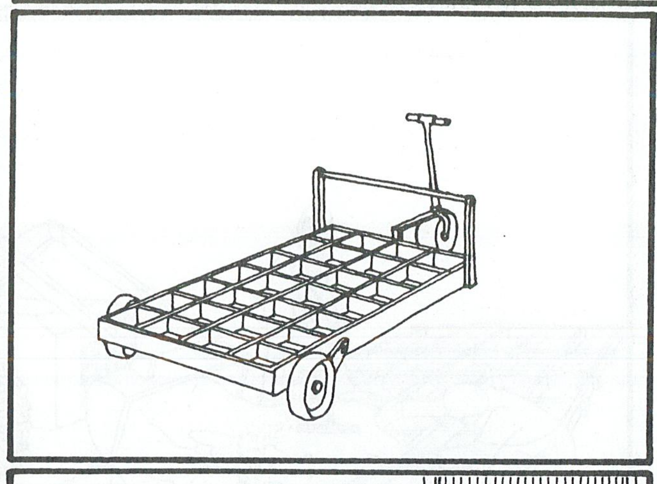


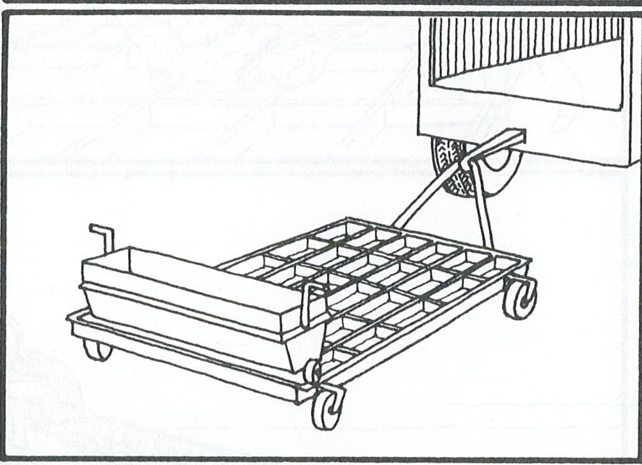


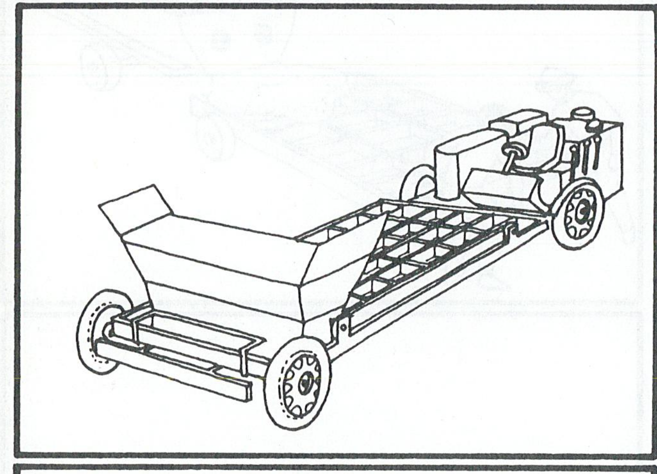
2 - ADOBES DECOUPEES

Il est possible de fabriquer une adobe de très grande taille - 4 m² p.e. - avec un moule à 4 planches de 2 m. On emploie une terre en pâte molle. Cette dalle d'adobe est ensuite découpée en plusieurs petites adobes, par sciage, à l'aide d'un fil tendu sur un support en bois ou avec une planche cloutée sur sa tranche, dans toute sa longueur. Les rendements sont similaires à ceux évoqués précédemment. L'investissement est très faible mais les adobes ont une moins bonne finition. L'aire de moulage doit être parfaitement plane.











La distance à franchir entre un procès de production à grande échelle à moules multiples et la mécanisation, n'est pas très importante.

1 - PONDEUSE A MOULE

Un moule métallique à compartiments multiples est fixé sur un châssis à roues. Un système de levier soulève le moule après le remplissage; les adobes sont déposées sur le sol. Le moule sur roues est alors tiré vers la station suivante. Le chariot de moulage doit pouvoir être lavé chaque fois. Il est possible d'adapter une trémie mobile au-dessus du moule, remplie par un dumper. La pâte molle se déverse dans le moule depuis la trémie qui est tirée au-dessus du moule. Le surplus de terre est ôté avec une raclette qui peut être adapté à la trémie. Les taux de production classiques sont de l'ordre de 7 000 à 10 000 adobes/jour. Ce principe a été sophistiqué avec la pondeuse Hans Sumpf (USA) qui est conçue comme une unité autonome. Les rendements peuvent atteindre 20 000 blocs/jour. Les adobes sont déposées sur du papier imperméable, déroulé à même le sol, sur une aire de production gigantesque. L'emploi de ce type de machine exige toute une installation de production en amont pour suivre cette énorme capacité de production. L'investissement total est de quelques centaines de milliers de US $.

2 - PONDEUSE A DISQUES

Le procédé du découpage au fil peut être automatisé et le fil remplacé par des disques. Une trémie pourvue d'une filière dépose un ruban continu de pâte molle qui est découpé en lanières. La machine est stoppée à distance fixe et les lanières sont découpées transversalement par un autre jeu de disques. Les rendements sont très élevés et atteignent les 15 000 blocs/jour pour un investissement assez faible. L'aire de production doit être très plane et très propre et le mélange doit être très homogène et à la consistance idéale. Ce principe de production exige donc un savoir-faire confirmé. Le coût de ce type de machine est de l'ordre de 3 000 US $. On ne connaît à ce jour que des prototypes qui semblent très prometteurs.

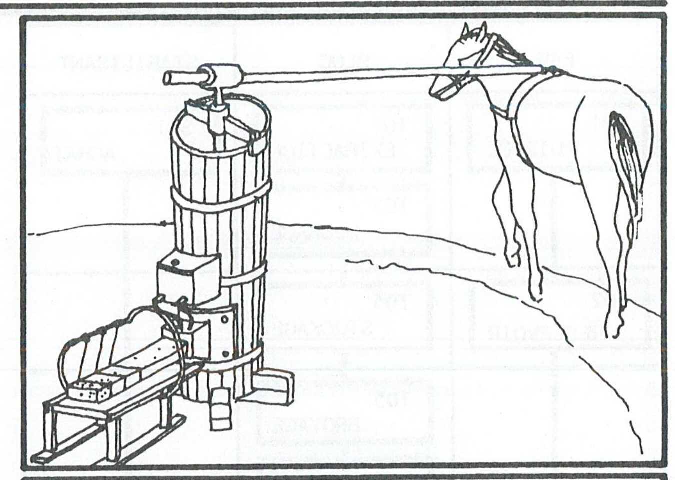
3 - EXTRUDEUSE

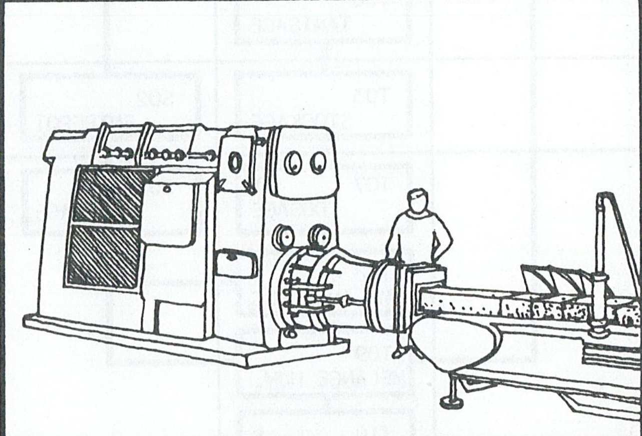
La fabrication d'adobes par extrusion offre des possibilités multiples et de grand intérêt. Appliquée à la production d'adobes, l'extrusion peut développer trois principaux procédés :

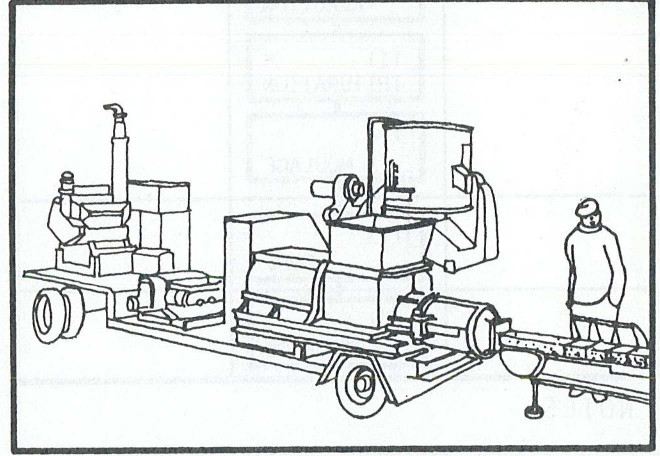
- 1 - **EXTRUDEUSE VERTICALE** : C'est un malaxeur vertical équipé d'une bouche d'extrusion. Le système peut être motorisé ou peut fonctionner grâce à la force animale. Ce procédé n'est quasiment plus utilisé aujourd'hui quoique très intéressant. Le coût, avec un moteur électrique serait d'environ 2 000 US $. Les rendements peuvent atteindre 1 500 briques/jour pour un malaxeur de petite taille pesant environ 500 kg. Des unités plus importantes sont aujourd'hui en fabrication (Ceratec).

- 2 - **EXTRUDEUSE HORIZONTALE** : Hérité de l'industrie céramique,ce procédé était couramment employé aux USA dans les années 40; il l'est toujours en Inde. L'investissement est lourd mais le système est efficace. On obtient les mêmes cadences que dans l'industrie briquetière pour des produits équivalents. La terre d'adobe est cependant plus sableuse que celle utilisée pour la fabrication de briques cuites. Elle est donc plus abrasive et il faut prévoir une très grande usure des surfaces de friction.

- 3 - **EXTRUDEUSE MOBILE** : Il existe aujourd'hui des unités d'extrusion mobiles,montées sur châssis à roues. Ce sont des engins lourds, d'environ 30 tonnes, groupant un malaxeur, un groupe électrogène et une extrudeuse. Quelques unités sont opérationnelles dans le monde pour la production de briques cuites. Elles pourraient tout aussi bien produire des briques crues. L'investissement est d'environ 250 000 US $ pour des rendements de l'ordre de 2 500 à 3 000 briques/heure.

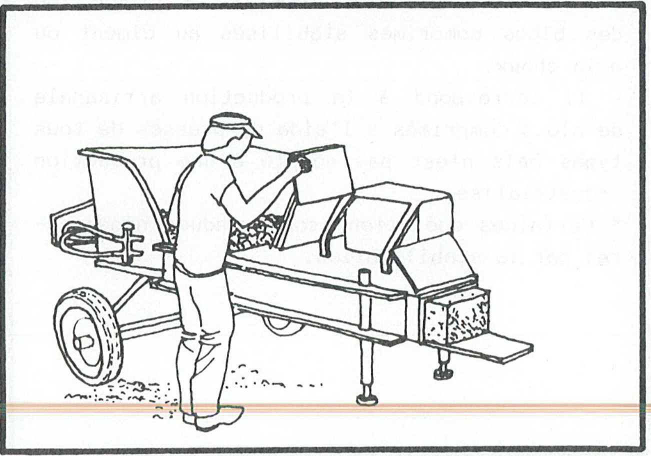


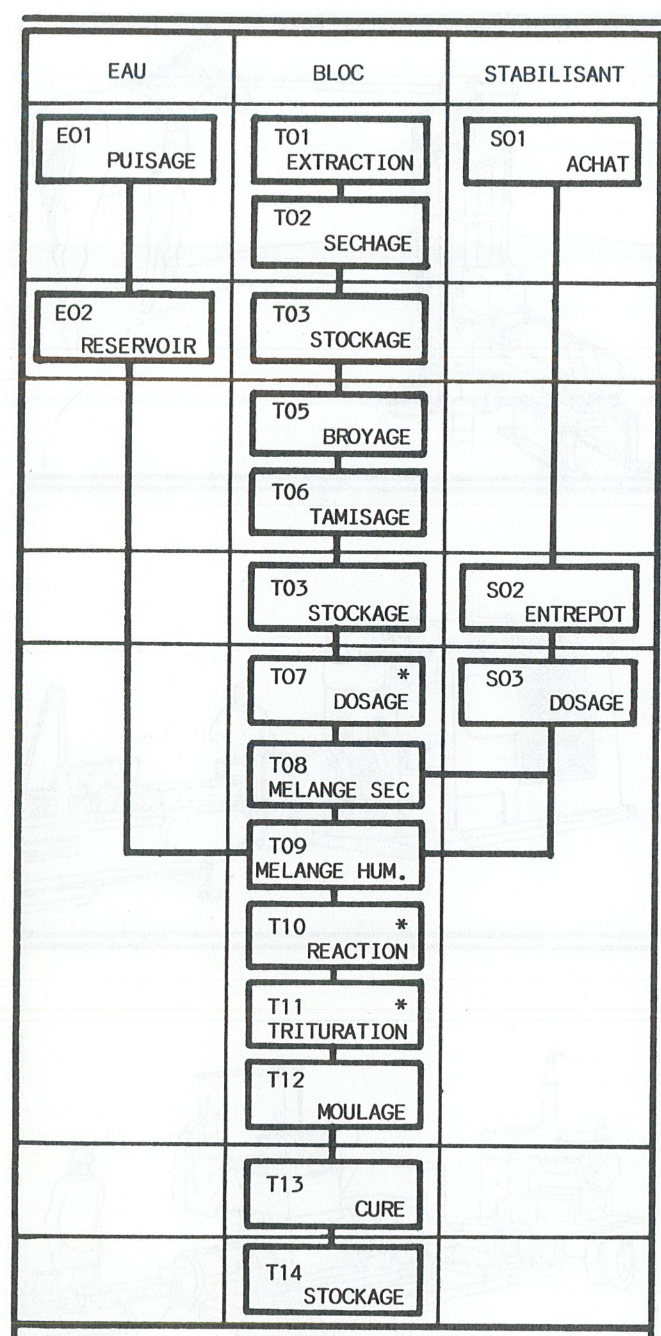




4 - PRESSE

Les tables de moulage classiques peuvent être remplacées par des presses. L'état hydrique de la terre est différent : pâte mi-ferme ou ferme. La pression nécessaire ne dépasse pas les 20 daN/cm². Le couvercle est pourvu d'un ou plusieurs trous de ø 10 mm pour faciliter l'extrusion du surplus. Parfois, une planchette est tout d'abord introduite dans le moule, sur laquelle est jetée la terre. Après pressage, l'éjection permet de saisir la planchette et de transporter l'adobe vers le séchage. Les rendements sont beaucoup plus élevés que pour la production de blocs comprimés.





NOTES

- Le schéma précédent décrit la production des blocs comprimés stabilisés au ciment ou à la chaux.
- Il correspond à la production artisanale de blocs comprimés à l'aide de presses de tous types mais n'est pas adapté à une production industrialisée.

* Certaines opérations sont rendues nécessaires par la stabilisation.

PRODUCTION

1 - UNITES DE PRODUCTION

La production de blocs comprimés est très similaire à celle des briques creuses si celles-ci sont fabriquées par compactage à partir de terre limoneuse (exceptée la cuisson). Le schéma de production précédent correspond à des petites briqueteries artisanales d'une capacité de 10 tonnes de blocs/jour, produits avec 2 presses manuelles et 25 ouvriers. Par contre, le schéma de production des usines intégrées évoque celui de l'industrie silico-calcaire dont il est d'ailleurs issu. P.e., le procédé Latorex est celui d'une usine livrable "produit en main", en 3 tailles : 2 500, 4 500, 9 000 blocs/heure. Entre les presses manuelles et les usines intégrées, le registre admet toute une gamme d'unités de production diverses et de capacité variée.

2 - PRODUITS

Aujourd'hui, le marché acceuille une large gamme de produits de terre comprimée. Ce registre est aussi divers que ceux, classiques, de l'industrie céramique et silico-calcaire, ou du parpaing de béton.

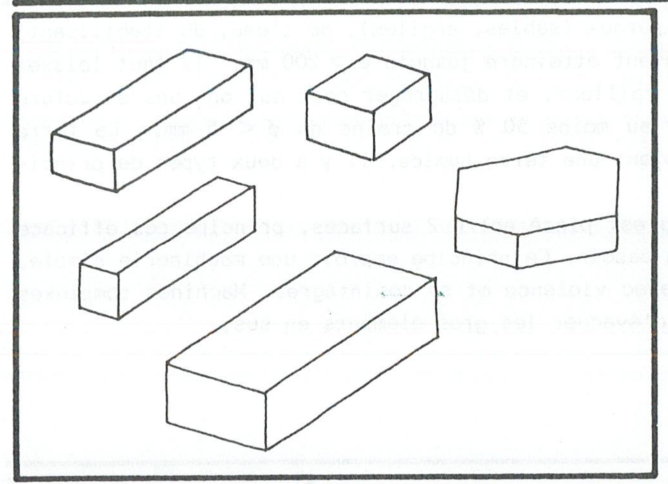
3 - PERIODES DE PRODUCTION

L'aire de production nécessaire est plutôt petite; l'aire de stockage des produits peut être aussi assez petite car les blocs finis, aussitôt démoulés, peuvent être empilés jusqu'à une hauteur de 1 m. La production des blocs comprimés peut être assurée en toute saison moyennant quelques dispositions de protection du stockage lors des premiers jours de cure sous des régimes climatiques rudes, très pluvieux ou très chauds.

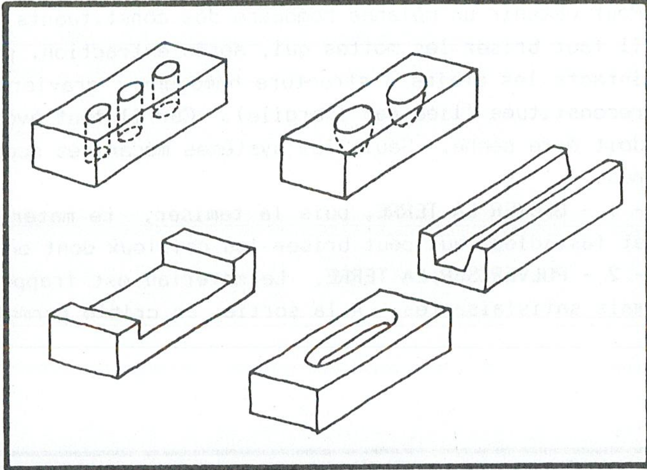
4 - EQUIPES ET RENDEMENTS

La taille des équipes et les rendements sont nettement tributaires du degré de mécanisation introduit. Les chiffres des constructeurs correspondent assez souvent aux cycles mécaniques théoriques des presses. Mais sur chantier, ces rendements sont souvent abaissés de 50 %, voire plus. Voici des valeurs de rendements classiques pour des briqueteries dotées de tout l'équipement de production en amont - extraction, criblage - et en aval du pressage - stockage, nettoyage.

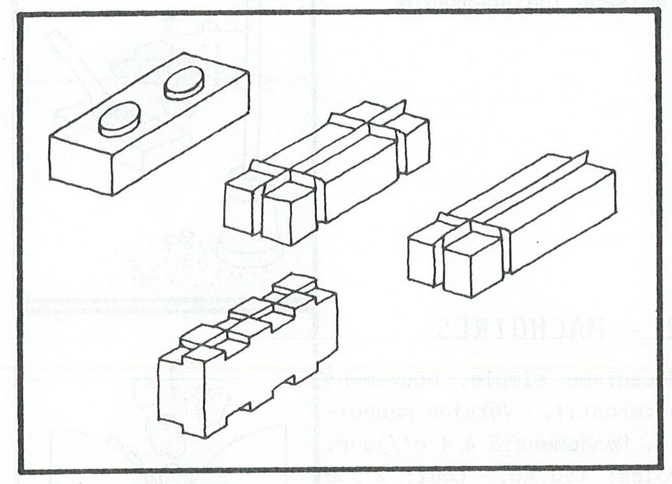
	P/JOUR	OUVRIERS	COUT - US $
MANUEL	300	4 à 8	3 000
MOTORISE	2 000	20	25 000
INTEGRE	10 000	10	100 000
USINE	60 000	15	1 000 000 et plus



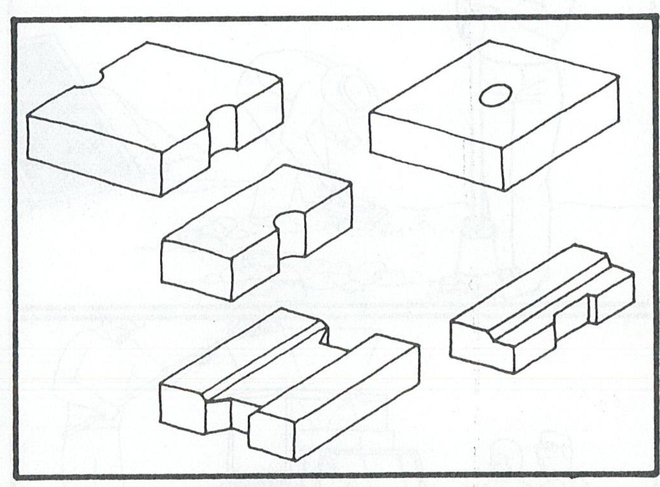
BLOCS PLEINS : ils sont principalement de forme prismatique : cubes, parallélépipèdes, hexagones multiples, etc... Leur usage est très divers.



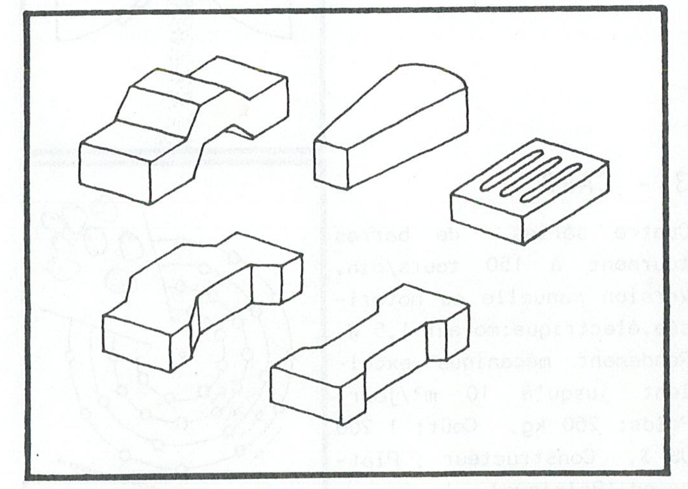
BLOCS CREUX : on observe normalement 15% de creux, 30% avec des procédés sophistiqués. Les creux améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs.



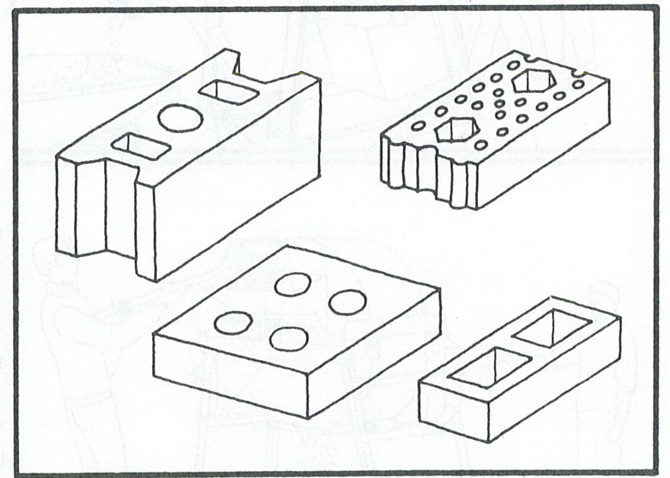
BLOCS A EMBOITEMENT : ils peuvent permettre de se passer de mortier mais exigent des moules sophistiqués et des pressions plus ou moins élevées.



BLOCS ANTISISMIQUES : leur forme améliore leur comportement antisismique ou permet une meilleure intégration de systèmes structuraux antisismiques: chaînages p.e.



BLOCS SPECIAUX : ces blocs sont fabriqués exceptionnellement pour une application très spécifique.



BLOCS ALVEOLAIRES : ils ont l'avantage de leur légèreté mais exigent des moules assez sophistiqués ainsi que des pressions plus fortes que la normale.

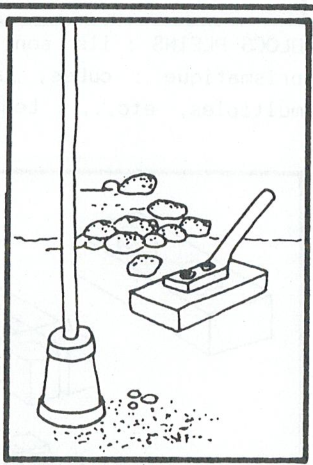
Pour obtenir un mélange homogène des constituants minéraux (sables, argiles), de l'eau, du stabilisant, il faut briser les mottes qui, après extraction, peuvent atteindre jusqu'à ∅ > 200 mm. Il faut laisser intacts les grains à structure homogène : graviers, cailloux, et désagréger ceux qui ont une structure reconstituée (liée par l'argile). Car il faut avoir au moins 50 % de grains de ∅ < 5 mm. La terre doit être sèche. Seuls les systèmes mécanisés acceptent une terre humide. Il y a deux types de principes.

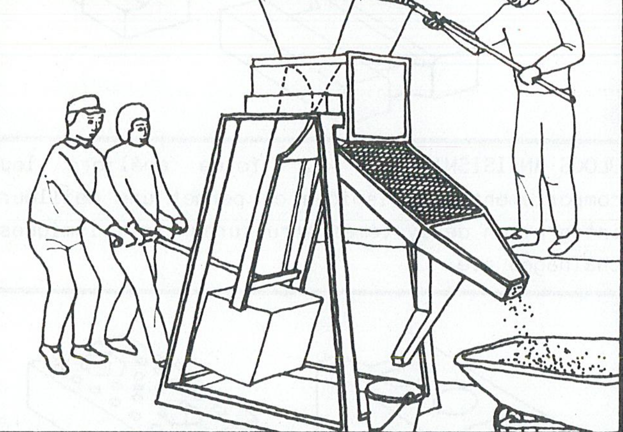
- 1 - **BROYER LA TERRE**, puis la tamiser. Le matériau est pincé entre 2 surfaces, principe peu efficace et fastidieux qui peut briser les cailloux dont on a besoin. Ce principe emploie une machinerie simple.
- 2 - **PULVERISER LA TERRE**. Le matériau est frappé avec violence et se désintègre. Machines complexes mais satisfaisantes. A la sortie, un crible permet d'évacuer les gros éléments en sus.



1 - PILONNAGE

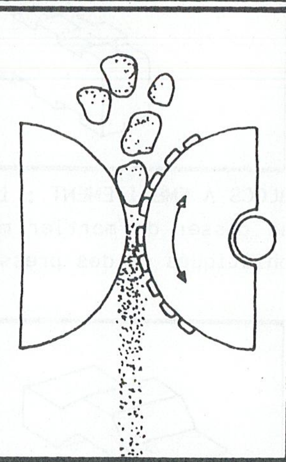
Procédé manuel; très lent; maximum 1 m³/jour/ouvrier. Tamisage indispensable.

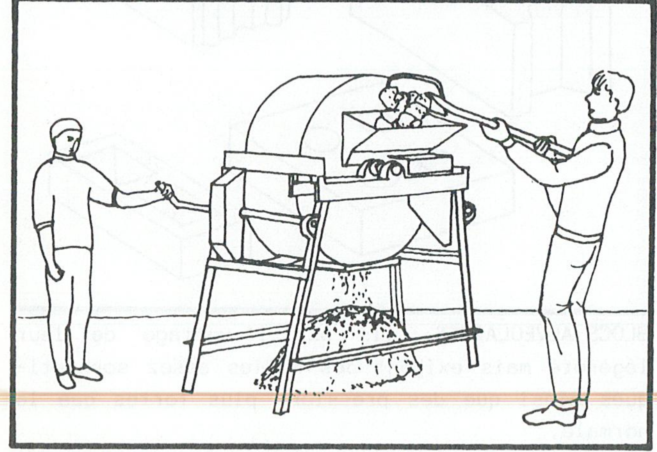




2 - MACHOIRES

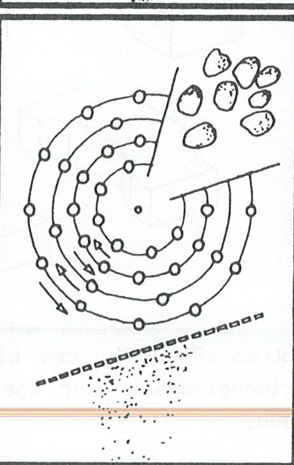
Mécanisme simple, mouvement alternatif. Version manuelle. Rendement:3 à 4 m³/jour. Poids: 150 kg. Coût: 2 500 US $. Constructeur : I.T. Workshops (United Kingdom).

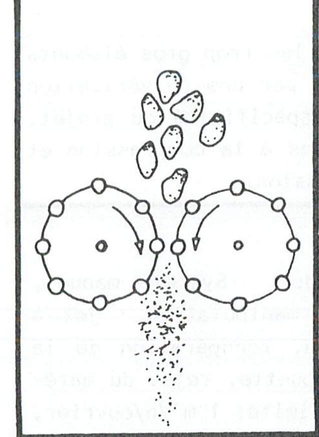




3 - CARR

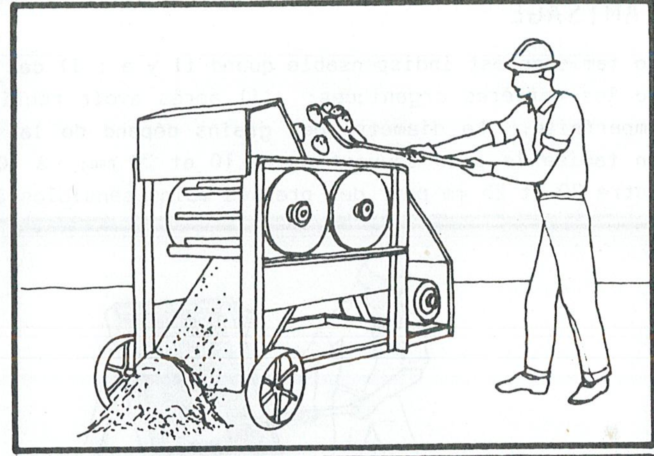
Quatre séries de barres tournent à 150 tours/min. Version manuelle ou motorisée,électrique:moteur 1,5 W. Rendement mécanique excellent jusqu'à 10 m³/jour. Poids: 260 kg. Coût: 1 200 US $. Constructeur : Platbrood (Belgique).

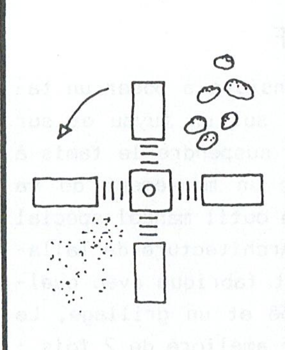




4 - CAGE D'ECUREUIL

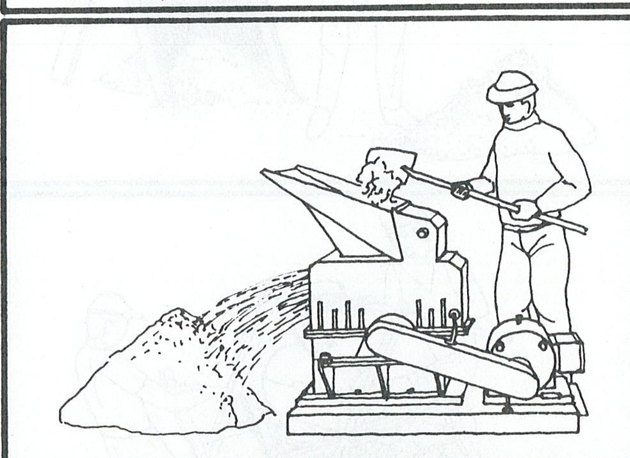
Rotation très rapide : 600 tours/min. Moteur électrique 3 CV. Rendement: 15 à 25 m³/jour. Poids : 150 kg. Coût : 2 000 US $. Constructeur : Ceratec (Belgique).

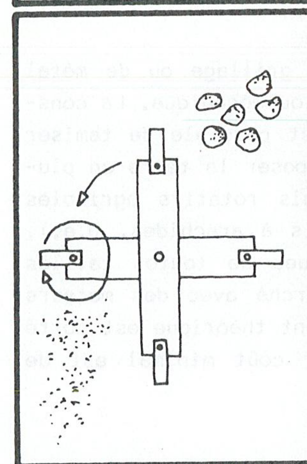




5 - MARTEAUX

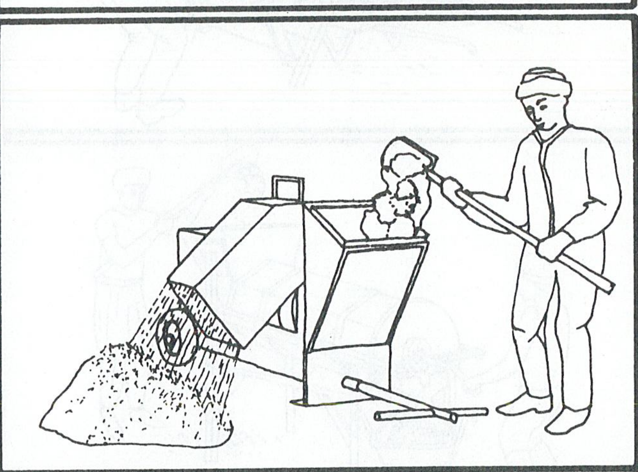
Plusieurs masses montées sur un axe central et sur ressorts frappent la terre à grande vitesse. Moteur : électrique 10 CV. Rendement: 40 m³/jour. Poids : 200 kg. Coût : 2 500 US $. Constructeur : Luxor (Brésil).

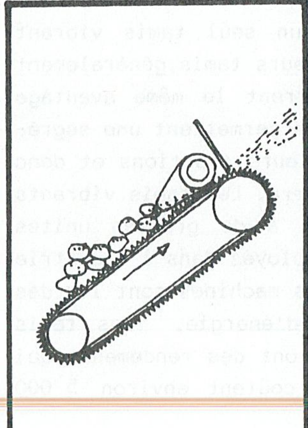




6 - HELICE

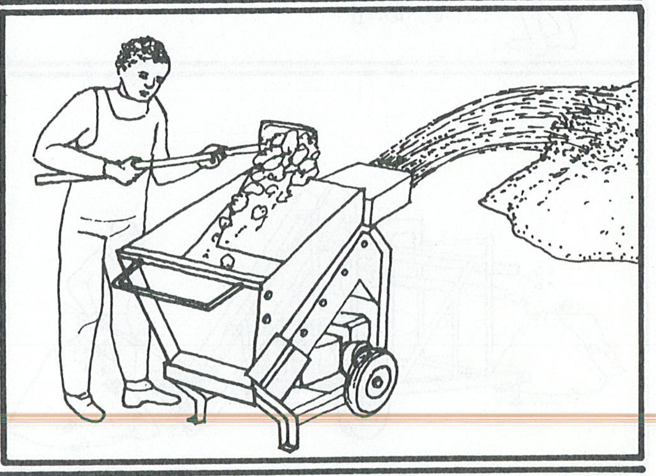
Système classique des machines à déchiqueter le compost que l'on peut également employer en prêtant attention à l'usure. Hélice simple ou en batterie. Moteur : diesel 5 CV. Rendement : 15 m³/jour. Poids : 200 kg. Coût: 2 000 US $. Constructeur : Consolid (Suisse).





7 - TAPIS DENTES

Seule machine à trémie, très efficace. Moteur : essence 3 CV. Rendement: 30 m³/jour. Poids: 100 kg. Coût: 2 000 US $. Constructeur : Royer.



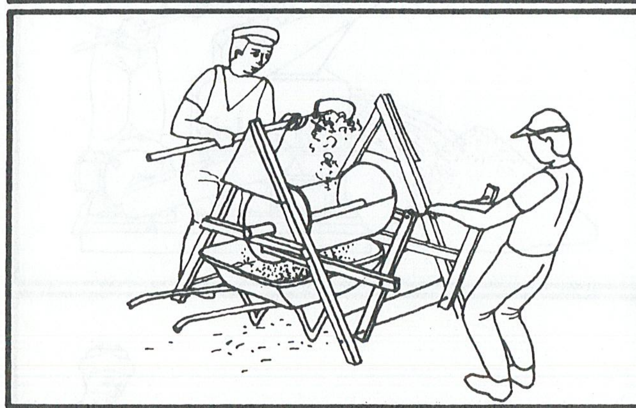
TAMISAGE

Le tamisage est indispensable quand il y a : i) des défauts de texture : enlever les trop gros éléments ou les matières organiques; ii) après avoir rectifié la structure de la terre par une pulvérisation imparfaite. Le diamètre des grains dépend de la technique employée et de la spécificité du projet. On tamise le plus souvent entre 10 et 20 mm; à 10 mm pour des presses sensibles à la compression et entre 20 et 25 mm pour des presses moins sensibles à la compression (hypercompression).



1 - TAMIS FIXE

Position oblique ou suspendue. Système manuel, facile à réaliser. Double manipulation : jet à la pelle de la terre brute, récupération de la terre tamisée chargée en brouette, rejet du matériau non criblé. Rendement limité: 1 m³/h/ouvrier, maximum. Coût : quelques US $.



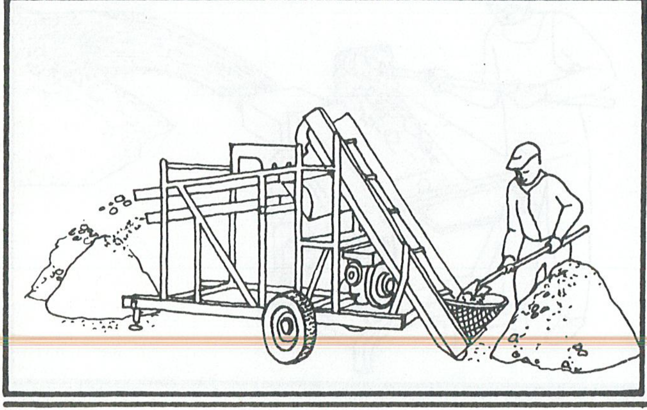
2 - TAMIS ALTERNATIF

Le procédé le plus simple consiste à poser un tamis sur cadre rectangulaire, sur un tuyau et sur une brouette. On peut aussi suspendre le tamis à une branche et lui imprimer un mouvement de va et vient. Dans cet esprit, un outil manuel spécial a été imaginé par l'Ecole d'Architecture de Tallahassee, Floride, USA. Il est fabriqué avec quelques planches, un fût découpé et un grillage. Le rendement d'un tamis fixe est amélioré de 2 fois : 2 m³/h/ouvrier. Coût : quelques US $.



3 - TAMIS ROTATIF

Il s'agit d'un cylindre de grillage ou de métal déployé à rotation manuelle ou mécanique. La construction est simple. Il est possible de tamiser en cascade et donc de décomposer la terre en plusieurs fractions. Des tamis rotatifs agricoles peuvent être employés (tamis à arachides, p.e.). Des tamis rotatifs mécaniques de toutes tailles sont disponibles sur le marché avec des moteurs de 1 à 30 CV. Leur rendement théorique est porté jusqu'à 14 m³/heure. Leur coût minimal est de 3 000 US $.



4 - TAMIS VIBRANT

Le procédé peut employer un seul tamis vibrant ou une combinaison de plusieurs tamis,généralement superposés. Ces tamis offrent le même avantage que les tamis rotatifs : ils permettent une ségrégation de la terre en plusieurs fractions et donc une reconstitution de la terre. Les tamis vibrants sont généralement destinés à de grosses unités de production. Ils sont employés dans l'industrie d'extraction: carrières. Ces machines sont lourdes et grandes consommatrices d'énergie. Les tamis vibrants de taille moyenne ont des rendements qui avoisinent 5 m³/heure et coûtent environ 5 000 US $.

MALAXAGE

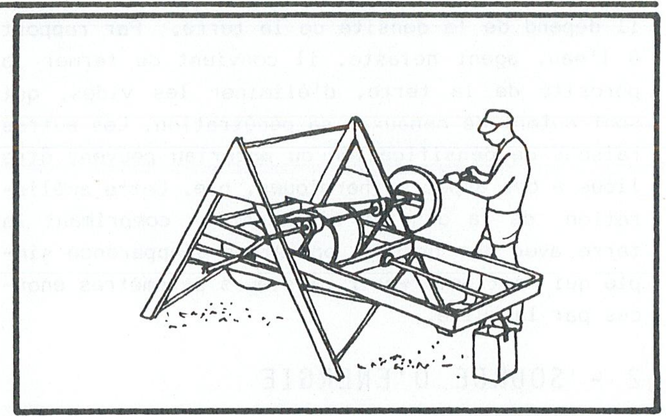
Le malaxage est particulièrement important. Un mélange homogène est indispensable, avec ou sans stabilisant. Manuellement, il faut retourner le tas de terre au moins 4 fois. Avec un malaxeur mécanique puissant, 3 à 4 minutes s'imposent. Il est indispensable d'opérer d'abord un malaxage à sec. Pour une humidification homogène, l'eau est soit ajoutée en pluie fine (arrosoir), en atomisation (nuage) ou en vapeur sous pression.

1 - MALAXAGE MANUEL

A la pelle,à la houe, au rateau ou avec tout autre outil similaire. Rendement: 1 à 2 m³/jour/ouvrier. Coût : quelques US $.

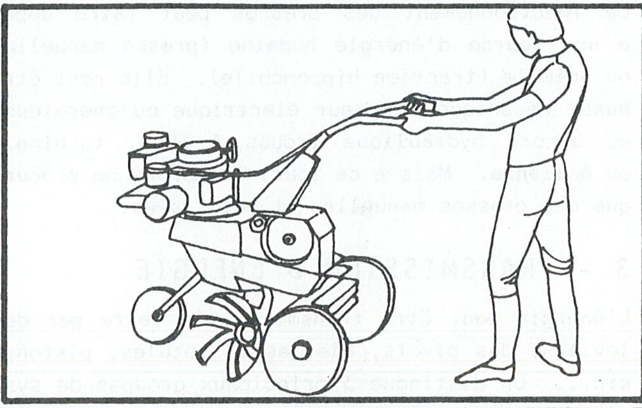
2 - MALAXEUR MANUEL

Diverses solutions ont été imaginées à partir de l'emploi de fûts d'huile de 200 litres, notamment par l'Ecole d'Architecture de Tallahassee,Floride, USA. Le rendement est légèrement supérieur à celui que donne l'emploi d'une pelle: 1,5 à 2,5 m³/jour/ouvrier. Coût : quelques US $.



3 - MALAXAGE MOTORISE

La motorisation facilite le malaxage qui est une opération lente. Mais, les bétonnières à béton classiques sont à proscrire car il y a formation de mottes et grumeaux.

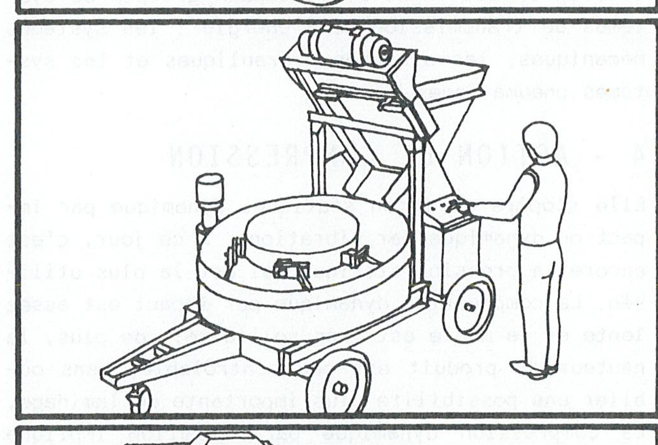


4 - MALAXEUR A FRAISES

Le motoculteur peut en même temps réaliser le broyage et le malaxage. L'opération demande beaucoup de place utile. Gamme très large en taille et en puissance. Rendement: à partir de 4 m³/jour. Coût : à partir de 1 500 US $.

5 - MALAXEUR PLANETAIRE

C'est un malaxeur classique de la filière béton. Les petits malaxeurs sont difficiles à trouver. 10 litres de terre nécessitent 0,5 CV en moteur électrique et 0,75 CV en diesel. Un malaxeur planétaire de 180 litres a un rendement de 15 m³/jour et le coût est à partir de 3 000 US $.

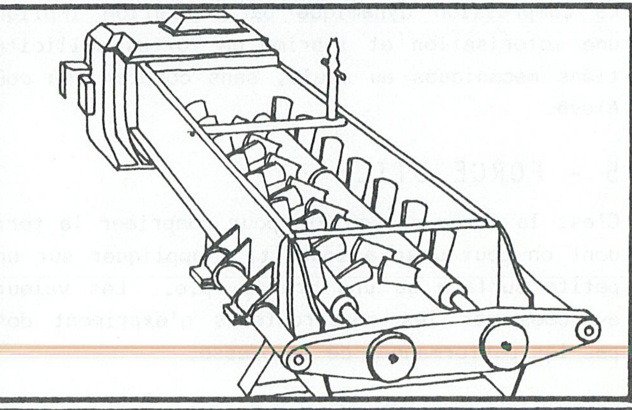


6 - MALAXEUR A PALETTES

Similaire aux malaxeurs à enduits et plus robustes. Marche bien pour une terre très sèche mais peut casser pour une terre humide (12-15 %). Puissance nécessaire: électrique,0,75 CV/10 l; diesel, 1 CV/10 l. Rendement pour une capacité de 150 l : 8 à 10 m³/jour. Coût : à partir de 2 000 US $.

7 - MALAXEUR LINEAIRE

Les pales sont montées sur un arbre en vis hélicoïdale discontinue, simple ou double. Il doit être très robuste. Très lourd et très cher, il est peu employé.



1 - PROBLEMATIQUE

La résistance mécanique d'une terre résulte du contact des grains, qui s'observe selon la texture et la structure. Le contact de texture importe beaucoup - il dépend du choix granulaire - mais le contact de structure augmente la résistance - il dépend de la densité de la terre. Par rapport à l'eau, agent néfaste, il convient de fermer la porosité de la terre, d'éliminer les vides, qui sont autant de canaux à sa pénétration. Les autres raisons de densification du matériau peuvent être liées à des aspects thermiques, p.e. Cette amélioration de la densité s'obtient en comprimant la terre avec une presse, opération d'apparence simple qui fait intervenir plusieurs paramètres énoncés par la suite.

2 - SOURCE D'ENERGIE

Le fonctionnement des presses peut faire appel à une source d'énergie humaine (presse manuelle) ou animale (traction hippomobile). Elle peut être aussi mécanique : moteur électrique ou thermique, ou encore hydraulique (roues à aube, turbine), ou éolienne. Mais à ce jour, le marché ne procure que des presses manuelles et motorisées.

3 - TRANSMISSION D'ENERGIE

L'énergie peut être transmise à la terre par des leviers, des pivots, bielles ou rotules, pistons, etc... On distingue 3 principaux groupes de systèmes de transmission de l'énergie : les systèmes mécaniques, les systèmes hydrauliques et les systèmes pneumatiques.

4 - ACTION DE COMPRESSION

Elle s'opère de façon statique, dynamique par impact ou dynamique par vibration. A ce jour, c'est encore la pression statique qui est la plus utilisée. La compression dynamique par impact est assez lente et le moule est très sollicité; de plus, la hauteur du produit est peu contrôlable, sans oublier une possibilité plus importante du laminage. La compression dynamique par vibration implique une motorisation et imprime de fortes sollicitations mécaniques au moule, sans compter son coût élevé.

5 - FORCE UTILE

C'est la force disponible pour comprimer la terre dont on peut user à souhait, l'appliquer sur une petite surface ou une grande, p.e. Les valeurs avancées par les constructeurs n'expriment donc pas les performances de la presse.

6 - PRESSION DE MOULAGE

Elle permet de mieux apprécier le "potentiel" de la presse. C'est la pression qui est théoriquement appliquée à la terre et qui exprime le rapport entre la force utile et la surface sur laquelle elle est appliquée.

Basse pression	: 0 à 40 daN/cm²;
Moyenne pression	: 40 à 60;
Haute pression	: 60 à 100;
Hyperpression	: 100 à 200;
Magapression	: 200 à 400 daN/cm² et plus.

7 - PRESSION MOBILISABLE

C'est la pression qui arrive vraiment sur la terre et elle peut être très différente de la pression de moulage théorique. La pression mobilisable varie selon la position de pénétration du tablier dans le moule où l'espace se raccourcit. Pour chaque position de raccourcissement, la pression mobilisable est différente, selon le mécanisme de transmission de l'énergie. Chaque presse décrit des courbes et pour les presses manuelles, ces courbes varient selon le poids de l'opérateur.

8 - COEFFICIENT D'EFFET DYNAMIQUE

Il y a un effet d'inertie ou un effet dynamique qui s'interpose entre la mesure statique de la pression mobilisable et l'opération réelle d'une presse qui profite de sa lancée. Ainsi, pour une presse manuelle à levier, on applique un coefficient d'effet dynamique de 1,2 qui élève la pression mobilisable réelle.

9 - PRESSION REELLE

C'est la pression qui est réellement appliquée à la terre en fin de cycle de compression. Elle intègre tous les effets de fonctionnement, de friction, d'inertie. Ainsi, pour une petite presse à levier (Cinva Ram), la pression réelle, dans les meilleures conditions est de 15 à 20 daN/cm², alors que la littérature mentionne jusqu'à 45 daN/cm².

10 - PRESSION ABSORBEE

La terre, en se comprimant, absorbe la pression mobilisable et devient de plus en plus difficile à comprimer : la friction interne et la friction contre le moule augmentent. La pression absorbée varie donc aussi selon le raccourcissement et selon la qualité de la terre. La courbe de pression absorbée d'une terre graveleuse est plus haute que celle d'une terre fine. Pour assurer une compression de la terre, la pression mobilisable doit être supérieure à la pression absorbée sinon le cycle de la presse s'arrête.

11 - PRESSION NECESSAIRE

De quelle pression a-t-on vraiment besoin ? Le potentiel de la presse est une chose, la qualité de la terre une autre et le budget de l'usager une troisième chose. La qualité visée du produit exige telle ou telle pression. Les constructeurs de presses pensent qu'il faut comprimer le plus possible. L'usager constate que la qualité de la compression coûte cher. La croissance de qualité du bloc est linéaire en fonction de la compression mais s'arrête souvent entre 40 et 100 daN/cm² pour devenir assymptotique ou éventuellement rechuter. De trop grandes pressions de moulage peuvent en effet être néfastes : laminage p.e.

12 - TAUX DE COMPRESSION

La terre foisonnée, mise dans le moule, a une densité qui varie de 1 000 à 1 400 kg/m³. Comprimée, elle doit avoir une densité minimale de 1 700 kg/m³ ou voisinant la valeur du Proctor. Le taux de compression est le rapport entre la hauteur du moule avant compression et après compression nécessaire à l'obtention de la densité visée. Il est de 1,65 pour les presses manuelles à levier mais doit être de préférence égal à 2. Ce taux est rarement obtenu avec des systèmes mécaniques mais un précompactage manuel ou mécanique de la terre dans le moule résoud cet inconvénient.

13 - GRADIENT DE COMPRESSION

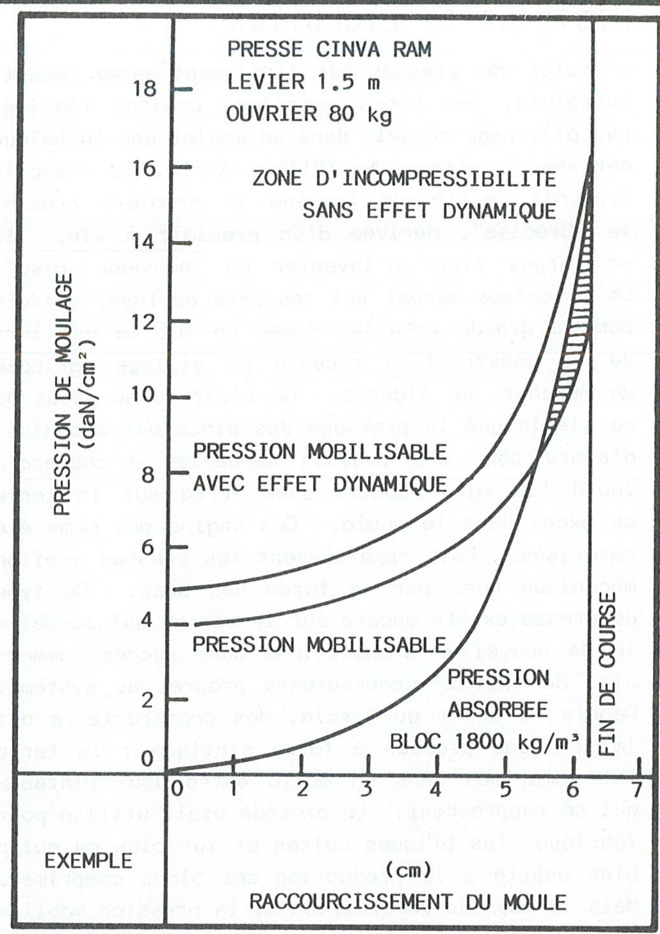
Du fait de l'augmentation de la friction interne de la terre et de la pression contre les parois du moule, le matériau qui est plus proche de la table de compression est mieux comprimé qu'à proximité du couvercle. Cette variation de qualité dépend de la hauteur du produit final. Pour obtenir des blocs de qualité en basse pression, on doit limiter la hauteur à 9 à 10 cm et en hypercompression à 20 à 25 cm.

14 - MODE DE COMPRESSION

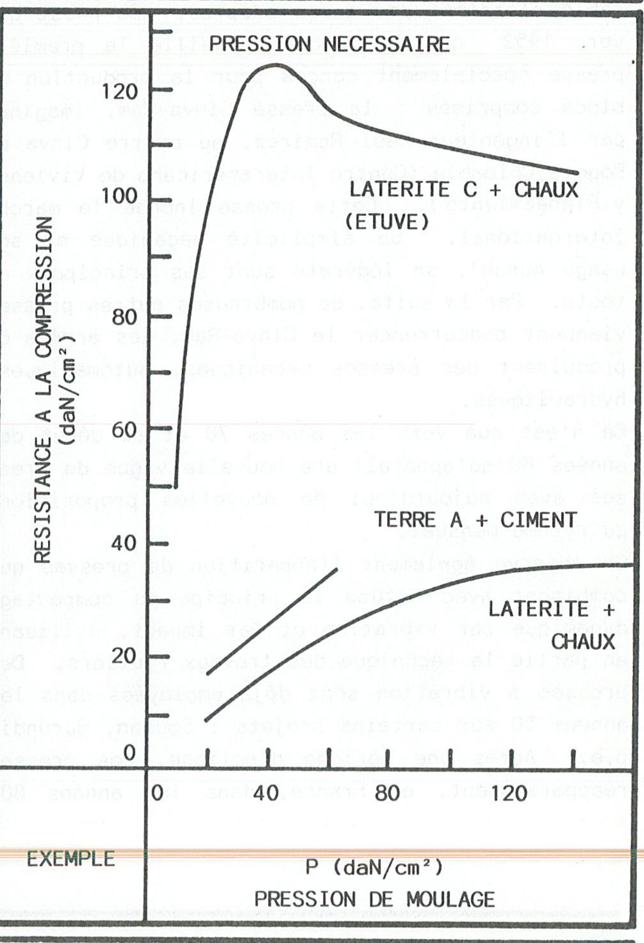
Pour une pression statique simple, la hauteur de moulage de blocs de qualité est limitée à 10 cm. Une pression double appliquée des deux côtés en même temps peut permettre de produire des blocs de 20 à 25 cm de hauteur. La terre la moins compactée se trouve dans la zone centrale la moins sollicitée.

15 - VITESSE DE COMPRESSION

L'impératif de production peut imposer des cadences élevées. Mais, la vitesse de compression est limitée à 1 à 2 sec. pour des blocs de 10 cm sous risque de laminage.



EXEMPLE



EXEMPLE

HISTOIRE ET EVOLUTION

L'emploi des presses est finalement assez récent. Autrefois, les blocs comprimés étaient réalisés par pilonnage manuel, dans un moule; une technique dérivée du pisé. Au XVIII° siècle, le français François Cointeraux imagine la première presse, la "Crécise", dérivée d'un pressoir à vin. Il se targue alors d'inventer un "nouveau pisé". Le pilonnage manuel est toujours employé, parfois même à grande échelle, comme ce fut le cas lors de la construction récente du village agricole de Maadher, en Algérie. Ce n'est qu'au début de ce siècle que le pressage des blocs est mécanisé; d'abord pour des presses manuelles à couvercle lourd (30 kg), rabattu avec force sur la terre en excès dans le moule. Ces engins ont même été motorisés. Puis apparaissent les presses à pilon mécanique mues par la force des bras. Ce type de presse existe encore sur le marché qui accueille de nouvelles propositions sans succès commercial du fait d'inconvénients propres au système. Depuis le début du siècle, des constructeurs ont imaginé des presses à force statique : la terre est comprimée dans un moule entre deux plateaux qui se rapprochent. Le procédé était utilisé pour fabriquer les briques cuites et fut plus ou moins bien adapté à la production des blocs comprimés. Mais le taux de compression et la pression mobilisable n'étaient pas assez adaptés. Ce n'est que vers 1952 que le marché accueille la première presse spécialement conçue pour la production de blocs comprimés : la presse Cinva-Ram, imaginée par l'ingénieur Raul Ramirez, au centre Cinva de Bogota,Colombie (Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento). Cette presse inonde le marché international. Sa simplicité mécanique et son usage manuel, sa légèreté sont ses principaux atouts. Par la suite, de nombreuses autres presses viennent concurrencer la Cinva-Ram. Les années 60 produisent des presses mécaniques, automatiques, hydrauliques.

Ce n'est que vers les années 70 et au début des années 80 qu'apparaît une nouvelle vague de presses avec aujourd'hui de nouvelles propositions au rythme mensuel.

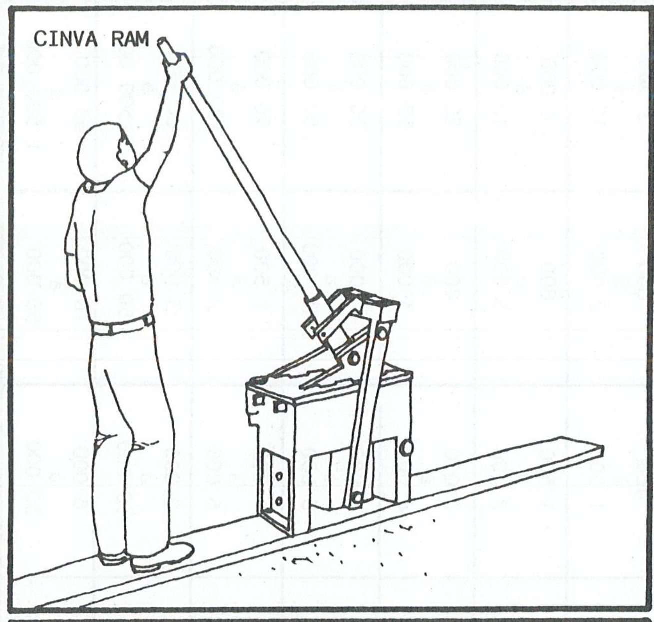
On observe également l'apparition de presses qui combinent avec astuce le principe du compactage dynamique par vibration et par impact, utilisant en partie la technique des travaux routiers. Des presses à vibration sont déjà employées dans les années 50 sur certains projets : Soudan, Burundi, p.e. Après une période d'éclipse, ces presses réapparaissent, en France, dans les années 80.

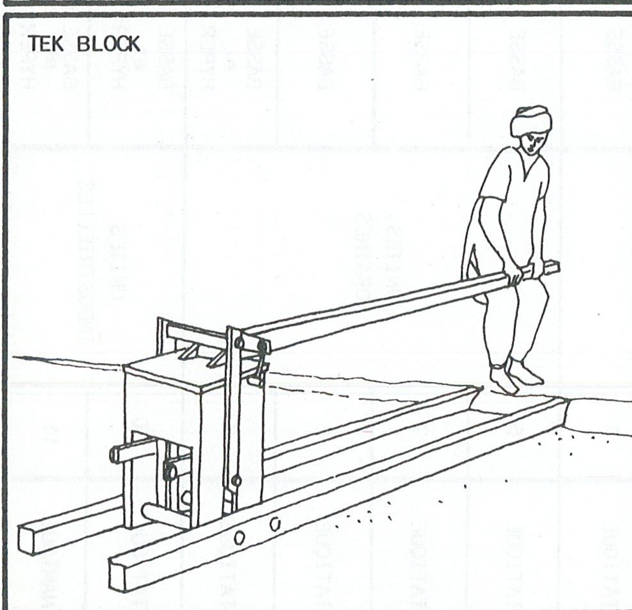
BILAN DU MARCHE

Aujourd'hui, la préférence des nouveaux constructeurs va vers les presses hydrauliques. Les constructeurs qui ont une expérience du terrain et des chantiers s'orientent plutôt vers le développement de petites presses mécaniques robustes et simples mais fiables et efficaces. La difficulté à trouver des presses sur le marché il y a seulement 10 ans, et même il y a 5 ans, est aujourd'hui révolue. La gamme de matériel de pressage est aujourd'hui très large, décrivant toutes les tendances techniques et le plus vaste registre de prix. Ces machines ne sont hélas pas toutes sans défauts et la perspicacité de l'usager, les tests d'utilisation préalables demeurent un gage de choix approprié. On peut néanmoins dire que si la presse est un instrument essentiel, le choix de la terre est encore plus important. Mieux vaut presser une bonne terre avec une presse médiocre que presser une mauvaise terre avec une bonne presse. Cette remarque est fondamentale car il existe en effet aujourd'hui, sur le marché, des presses sophistiquées à hypercompression qui n'apportent rien de plus en qualité et en performance du matériau si la terre employée est médiocre.
Pour établir un bilan de la situation actuelle du marché, on peut observer les orientations suivantes :

- de plus en plus de presses manuelles sont aujourd'hui fabriquées en série, avec des ateliers de fabrication dans les p.e.d.;
- les presses motorisées investissent autant le marché des p.e.d. que celui des pays industrialisés;
- dans les pays industrialisés, un récent marché de l'autoconstruction et une demande des petites entreprises stimulent le développement de petites unités de production foraines;
- une orientation vers la promotion de grosses unités foraines comporte des risques énormes de non-faisabilité économiques;
- les unités industrielles investissent le marché des pays industrialisés et celui de quelques p.e.d. très avancés;
- les usines "production en main" présentent d'énormes risques et ne semblent pas faisables tant pour la plupart des pays industrialisés que pour l'ensemble des p.e.d. sauf rares exceptions (Mexique p.e.).

SYSTEME				CLASSEMENT DES TYPES DE PRESSES		CARACTERISTIQUES			
SOURCE D'ENERGIE	TAILLE	TRANSMISSION D'ENERGIE	ACTION DE COMPRESSION			PRESSION DE MOULAGE	POIDS (kg)	PRODUCTION JOURNALIERE (Blocs Cinva)	GAMME DE PRIX FOB (US $)
MANUEL	LEGER	MECANIQUE	STATIQUE	1	PRESSES MANUELLES	BASSE	50 à 100	300 à 800	250 à 1 000
		HYDRAULIQUE	STATIQUE	2		HYPER	30 à 150	300 à 400	2 000 à 3 000
	LOURD	MECANIQUE	STATIQUE	3		BASSE	200 à 500	400 à 1 000	1 000 à 2 000
MOTORISE	LEGER	MECANIQUE	STATIQUE	4	PRESSES MOTORISEE	BASSE	400 à 1 500	800 à 3 000	5 500 à 7 000
		HYDRAULIQUE	STATIQUE	5		BASSE	400 à 1 500	800 à 2 000	2 500 à 10 000
		MECANIQUE	STATIQUE	6	UNITES FORAINES	BASSE	1 500 à 2 000	800 à 3 000	6 000 à 12 000
		HYDRAULIQUE	STATIQUE	7		BASSE	2 000 à 4 000	800 à 3 000	20 000 à 55 000
	LOURD	MECANIQUE	STATIQUE	8		BASSE	4 000 à 6 000	2 000 à 15 000	30 000 à 50 000
		HYDRAULIQUE	STATIQUE	9		BASSE et HYPER	4 000 à 6 000	1 500 à 2 500	70 000 à 100 000
		HYDRAULIQUE	STATIQUE	10	UNITES INDUSTRIELLES	BASSE et HYPER	2 000 à 30 000	3 000 à 50 000	60 000 à 1 500 000
		HYDRAULIQUE et MECANIQUE	DYNAMIQUE	11		BASSE et HYPER	6 000 à 30 000	10 000 à 50 000	60 000 à 1 500 000







PRESSES LEGERES

1 - TYPE 1 : PRESSES MECANIQUES

Les avantages des presses de type Cinva-Ram sont évidents : légèreté, certaine robustesse, faible coût, simplicité de fabrication et de réparation. Les inconvénients majeurs sont : usure prématurée (anneaux de rotule), un seul module de moule, pression faible, rendement assez bas. Elle n'en reste pas moins l'une des meilleures presses du marché dans son type où ce sont le plus souvent les modèles copiés qui offrent une usure prématurée. Les astuces de la presse Cinva-Ram ne sont pas toujours bien compris par les concepteurs plagiaires. Cette presse peut être néanmoins améliorée. Voici quelques unes des améliorations imaginées par les concepteurs : solidarisation du couvercle au manche (Tek-Block); meilleur mécanisme d'éjection (Stevin, Ceneema); plus grande hauteur de moulage (Ait Ourir); meilleure transmission d'énergie (Dart-Ram); couvercle rabattable (Meili); profil d'acier standard (Unata); compactage double action (DS); moule compartimenté (MRC1); production de blocs alvéolaires (Ceta-Ram). Ces améliorations techniques visent aussi une amélioration de la production qui reste finalement assez indépendante du cycle mécanique de la presse. En effet, la production est davantage tributaire du mode d'organisation du travail, du mode de paiement des équipes, d'une tradition ergonomique. Ainsi, le rendement moyen d'une Cinva-Ram, ou presse similaire, est de 300 blocs/jour; bien qu'il ait pu être porté à 1 200 blocs/jour. Ces presses sont désormais produites en de nombreux pays : USA, Suisse, Belgique, Cameroun, Zambie, Tanzanie, Colombie, Nouvelle Zélande, Haute-Volta, Maroc. Les plans de la plupart de ces machines sont disponibles sur le marché. En 1982, le LBTP d'Abidjan (Côte d'Ivoire) a rédigé un cahier des charges pour l'élaboration d'une nouvelle presse mécanique légère, sur la base de données techniques issues de ses recherches. La conception a été confiée à l'IPNET, et le premier prototype fut réalisé la même année.

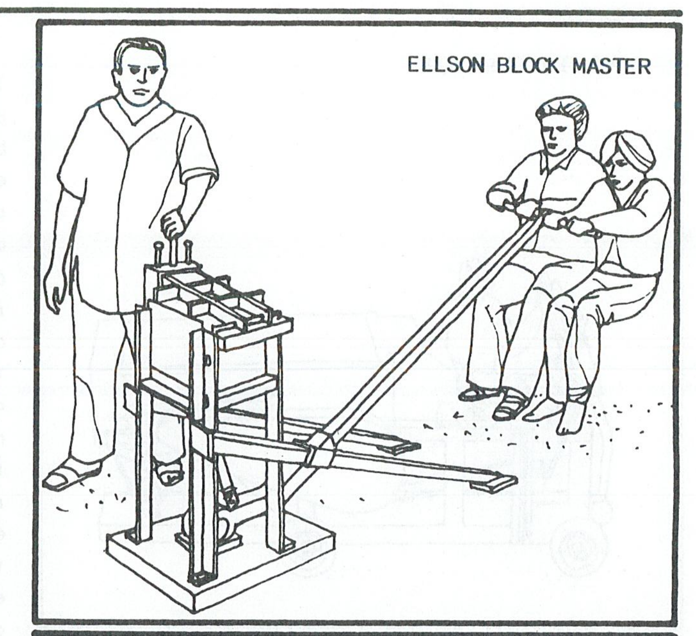
2 - TYPE 2 : PRESSES HYDRAULIQUES

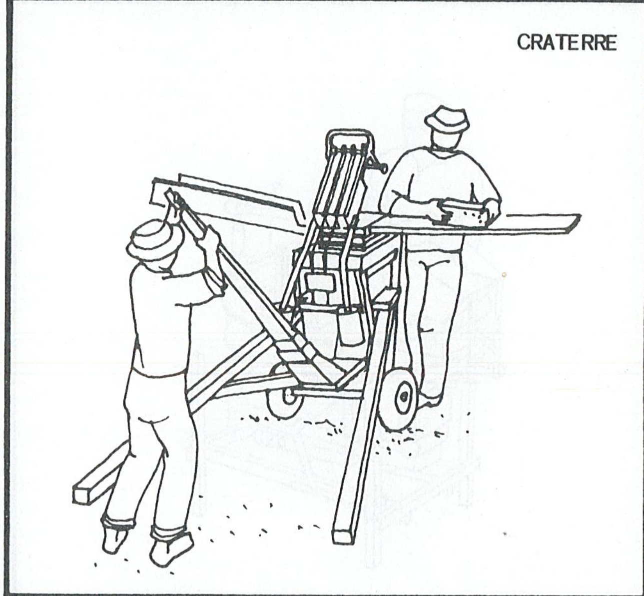
Une petite presse a apporté une véritable amélioration à la Cinva-Ram : la presse Brepak, créée par le BRE(Angleterre)et commercialisée par Multi-Bloc; le système de rotule et bielle de la Cinva a été doublé d'un piston hydraulique qui permet l'obtention de pressions de 100 daN/cm². Les blocs produits sont identiques à ceux de la Cinva, en dimensions mais plus denses d'environ 20 %. Son hypercompression la rend utile pour le compactage de sols très expansifs comme les terres noires tropicales.

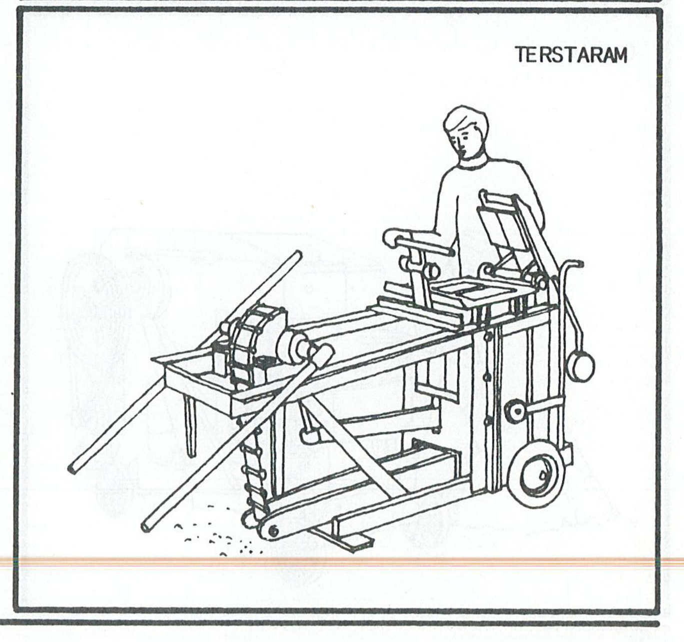
PRESSES LOURDES

3 - TYPE 3 : PRESSES MECANIQUES

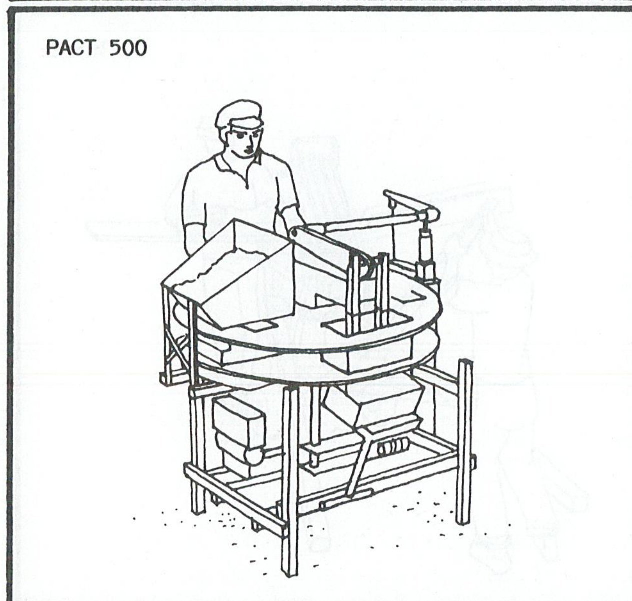
Elles offrent des pressions supérieures au seuil minimum de 20 daN/cm²; l'usure du matériel est très faible car elles sont robustes. Leur manipulation est aisée et leur entretien facile. Elles disposent de moules interchangeables. Leur couvercle rabattable donne un pré-compactage. Le mouvement de va et vient d'un côté à l'autre de la presse est supprimé. La conception de la machine permet une meilleure organisation du travail autour de la presse. A l'opposé de ces avantages, ces presses sont plus lourdes, et plus coûteuses : de 1 à 7 fois, le prix d'une Cinva-Ram ou presses dérivées. Le prix de revient moyen du bloc reste néanmoins quasiment le même. Ces presses sont fiables et rentables. P.e., la Terstaram ou Ceraman, adaptée de l'industrie briquetière, fut au début commercialisée sous le nom de Stabibloc, S.M., etc... et Landcrete, en Afrique du Sud. Elle est aujourd'hui construite en Belgique mais également au Sénégal et sous peu dans d'autres pays d'Afrique. Tous les modèles ne sont pas de la même qualité. La vente de cette presse fait l'objet d'une spéculation : les modèles de ce type sont parfois vendus 6 à 10 fois leur prix d'origine. Le modèle Ellson Blockmaster est fabriqué en Inde et en Afrique du Sud. D'autres modèles du genre existent : la presse CRATerre, mise au point et exclusivement fabriquée au Pérou; la Saturnia, conçue par le ETH, en Suisse; la Yuya, réalisée par Trueba, au Mexique est adaptée à la fabrication de blocs à emboîtement.

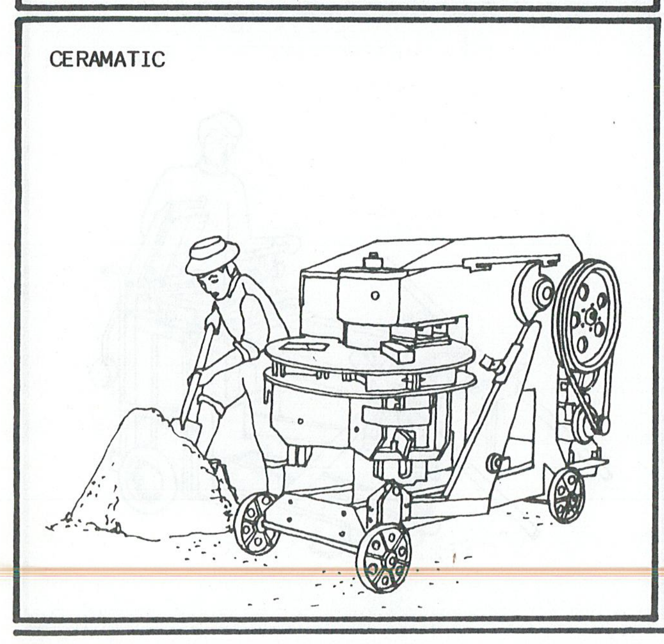

ELLSON BLOCK MASTER


CRATERRE


TERSTARAM







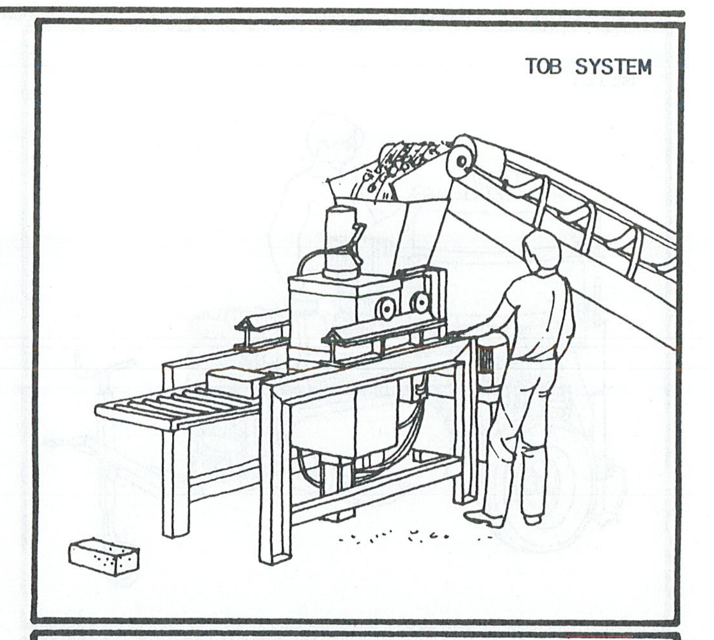
1 - TYPE 4 : PRESSES MECANIQUES

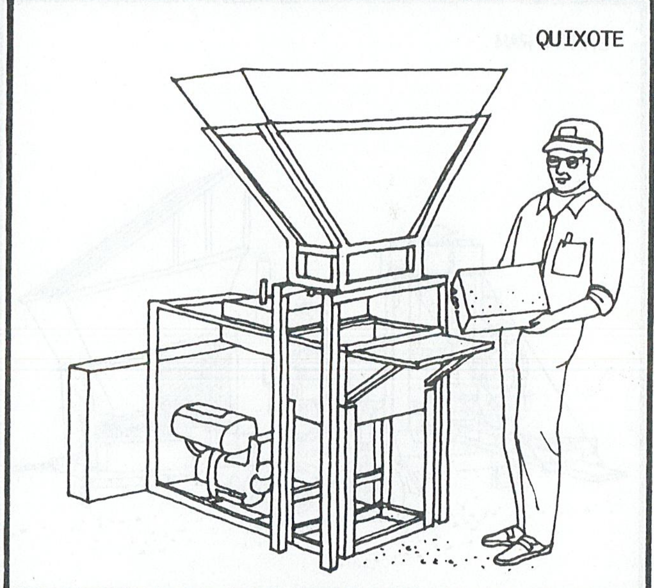
Il s'agit d'une nouvelle génération de presses actuellement disponible sur le marché et qui semble dotée d'un bel avenir. Malgré leur coût qui est de l'ordre de 4 à 7 fois supérieur à celui des presses manuelles lourdes, leur faisabilité économique demeure excellente. Certaines de ces presses comme la Semi-Terstamatique, sont directement dérivées de presses manuelles lourdes et profitent de l'expérience de leurs "anciennes". Ce modèle fut sur le marché à un certain moment sous les noms de Majo et LP9 (Landcrete). Les presses mécaniques motorisées sont de deux genres : à table fixe et moule unique,simple et robuste, et à table rotative et moule multiple (3 ou 4) qui permettent éventuellement une meilleure cadence de production. Dans le premier cas, le changement du moule est rapide et peu coûteux alors que dans le cas d'une table rotative, le changement du moule prend plus de temps et coûte plus cher. Les tables peuvent être tournées à la main (Pact 500), opération qui demeure fatigante ou tournées mécaniquement ce qui exige une mécanique plus sophistiquée et une quantité d'énergie plus élevée (Ceraman). Les systèmes à moule unique permettent un pré-compactage dynamique par rabattement du couvercle, avantage non négligeable. Un pré-compactage est possible sur les presses à table rotative, par l'adaptation d'un rouleau conique pré-compacteur monté entre la position remplissage et la position compactage; la terre doit légèrement déborder du moule ce qui ne peut se faire si la presse est dotée d'une trémie de remplissage. Les concepteurs de ce type de presses sont confrontés à quelques problèmes majeurs qui ne sont toujours pas résolus sur les presses commercialisées : la terre ne doit en aucun cas perturber le fonctionnement de la machine en pénétrant en des endroits indésirables; la sécurité de manipulation doit être garantie; la presse ne doit pas fonctionner à l'envers en cas d'inversion du moteur électrique au risque d'endommager la presse; dans le cas où la pression mobilisable est inférieure à la pression nécessaire (trop de terre dans le moule p.e.), la presse bloque : l'enlèvement de la brique à moitié compactée ne doit pas être une opération qui ralentit la production. Ainsi, la presse doit être pourvue d'un ressort de compensation et d'un débrayage du moteur.

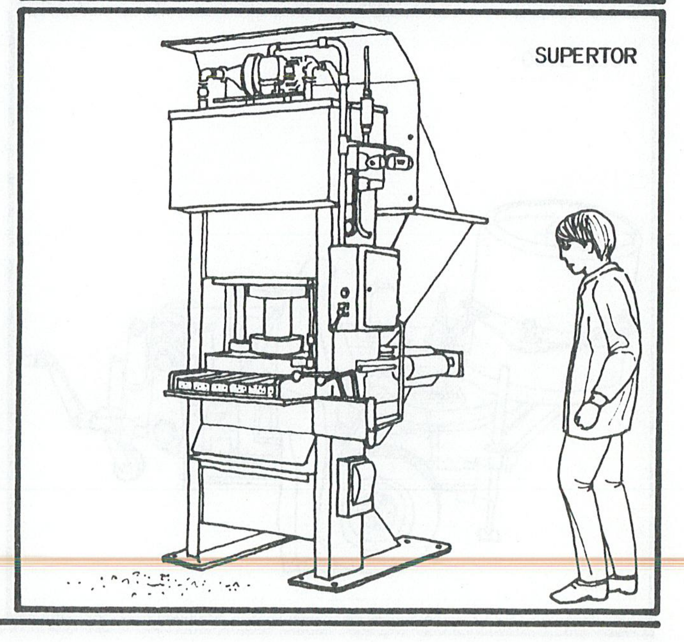
Enfin, les presses doivent être conçues pour que l'usager ait le choix du moteur électrique, thermique ou autre. Ces presses demeurent toujours très tributaires d'opérations de production en amont : criblage, dosage, malaxage.

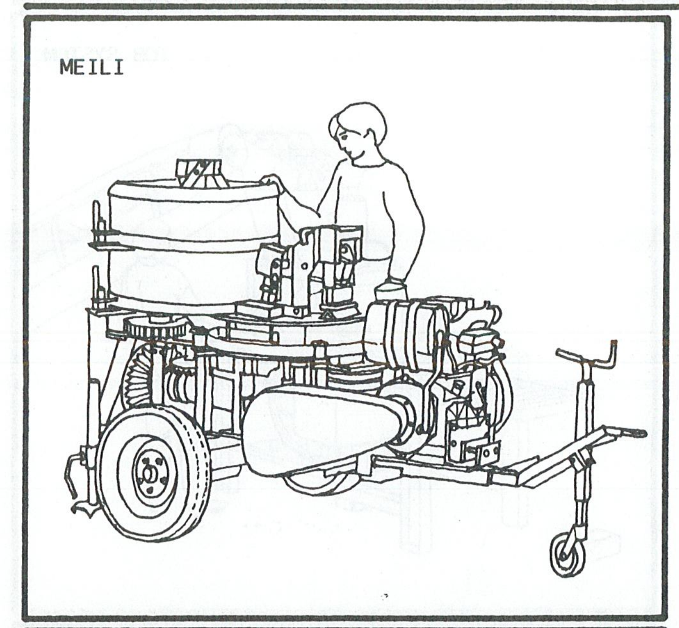
2 - TYPE 5 : PRESSES HYDRAULIQUES

Ce sont des presses autonomes à rendement médiocre et de coût assez élevé. Ces presses hydrauliques ont eu un certain succès (125 presses vendues) vers les années 50-60 mais ont rapidement disparus du marché (Winget, p.e.). De nouvelles presses du genre ont été lancées vers les années 70 mais leur fiabilité reste controversée car tout autant attachée à des déboires et des succès. Néanmoins, les systèmes hydrauliques présentent l'avantage d'autoriser, grâce au fonctionnement du piston et avec un faible encombrement, des courses importantes. On obtient ainsi des taux de compression égaux ou supérieurs à 2. Le réglage est aisé, selon les terres. On peut travailler avec une trémie, premier pas vers l'automation. L'hydraulique permet également d'appliquer aisément un double compactage, le cas, p.e., de la presse Tob System. Mais l'hydraulique occasionne aussi quelques problèmes qui lui sont propres : une pompe hydraulique demeure délicate. De plus, si la table rotative est aussi hydraulique, le réservoir d'huile doit être d'une capacité minima de 200 l. Malgré cette quantité d'huile, sous climat tropical, la température du fluide monte rapidement au-dessus de 70°C, t° maximale pour le bon fonctionnement de tous les accessoires hydrauliques sauf pour accessoires qui résisteraient à 120°C mais qui sont difficiles à trouver en cas de panne. L'alternative consiste en un système de refroidissement du circuit d'huile, qui complexifie le système. L'huile doit être changée et n'est pas toujours disponible. Ces presses fonctionnent éventuellement bien dans des environnements technologiques avancés mais souvent très mal en milieu rural et même péri-urbain, en p.e.d.
Ce type de presse connaît de nombreux modèles qui apparaissent et disparaissent sur le marché. Rares sont les machines fiables. Leurs origines sont très diverses : Belgique, France, USA, Brésil ...





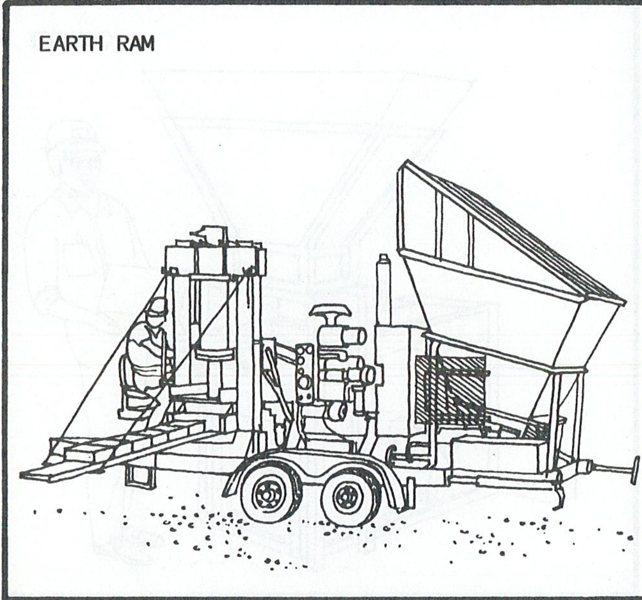



MEILI

Les presses motorisées exigent souvent une mécanisation importante des postes de travail en amont du pressage. Ainsi, les recherches des concepteurs ont évolué vers l'intégration de l'ensemble du matériel utile à des unités de production autonomes qui décrivent assez bien la tendance actuelle de fabrication. Mais, malgré des prix parfois convenables, la faisabilité économique des unités de production autonomes demeure problématique. Elles ne sont pas d'un emploi universel et exigent la réunion de conditions optimales. Même dans les pays industrialisés, ces machines travaillent dans des conditions économiques très serrées. Dans les p.e.d., leur utilisation est souvent anti-économique.

UNITES LEGERES

Elles offrent l'avantage d'ouvrir un marché tout à fait nouveau dans les pays industrialisés et en milieu urbain, dans les p.e.d. : la location aux autoconstructeurs; en effet, ces machines peuvent être louées pour la durée de production des blocs nécessaires à la construction d'un bâtiment, à des prix relativement acceptables. Néanmoins, ce type de machine n'est pas encore parfaitement au point, pèchant souvent par un manque d'harmonisation des différents types de matériels réunis. Un effort doit être engagé pour mieux harmoniser les rendements et les coûts de ces machines aux différents postes de production qu'elles intègrent.

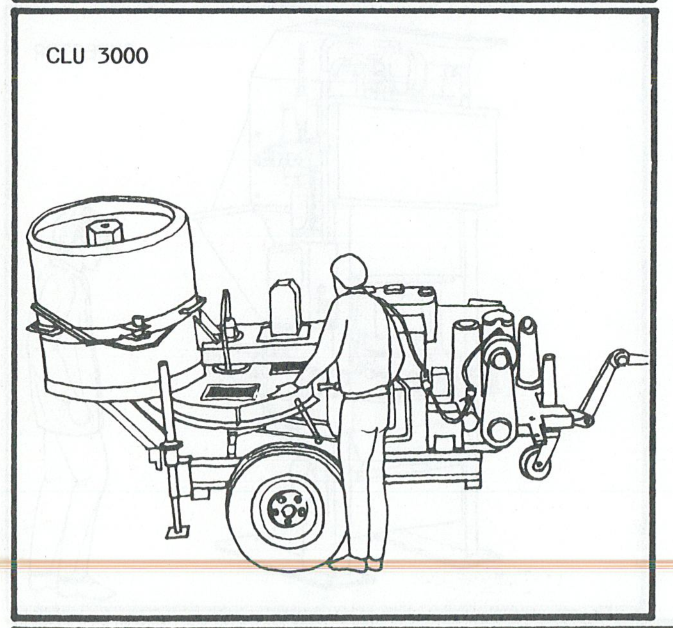

EARTH RAM

1 - TYPE 6 : PRESSES MECANIQUES

L'unité Meili (Suisse) est la seule représentante en ce moment sur le marché, de ce type de presses. La gamme de ce genre d'unité n'est pas très grande et il n'existe pas encore d'unité totalement intégrée. Le pulvérisateur fait encore défaut.

2 - TYPE 7 : PRESSES HYDRAULIQUES

On peut trouver plusieurs types d'unités de ce genre dont la Earth Ram (USA), Clu 2000 (RFA) et Clu 3000 (Suisse). Ces machines sont parfois adaptées d'unités statiques. Le principe de conception est très intéressant mais le calcul de coût démontre que l'achat de matériels de production séparés - pulvérisateur, malaxeur, presse - est meilleur marché pour de grands chantiers. L'efficacité d'un matériel non intégré n'est pas moindre et la commodité du matériel intégré non assurée.


CLU 3000

UNITES LOURDES

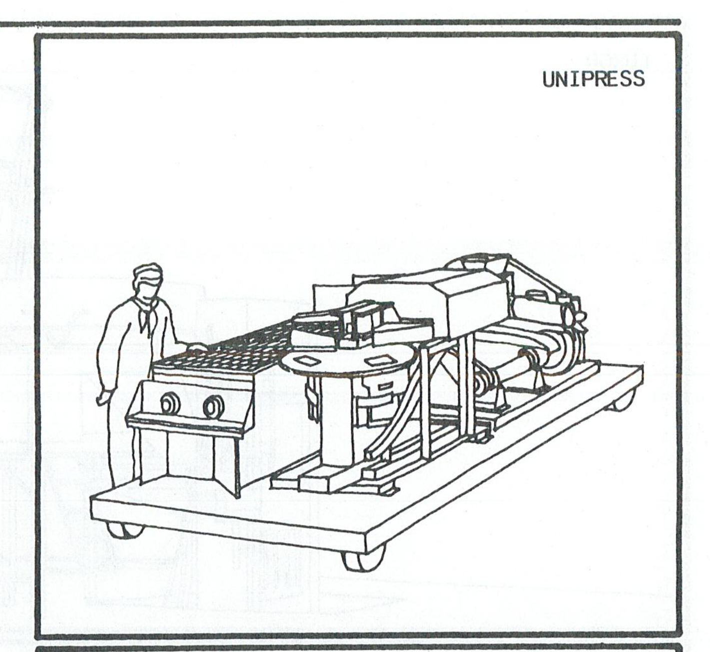
Quelques grands groupes ou industriels de la construction proposent aujourd'hui des unités mobiles, totalement transportables mais de grande taille et lourdes. Les capacités de production annuelle annoncées sont très importantes. Ce matériel est élaboré à partir du genre évoqué en type 7 et la tendance actuelle va vers l'emploi de l'hypercompression. A ce jour, quelques unités seulement, du genre, sont construites. La faisabilité économique de ces presses reste sujette à caution et des études sérieuses doivent précéder leur acquisition.

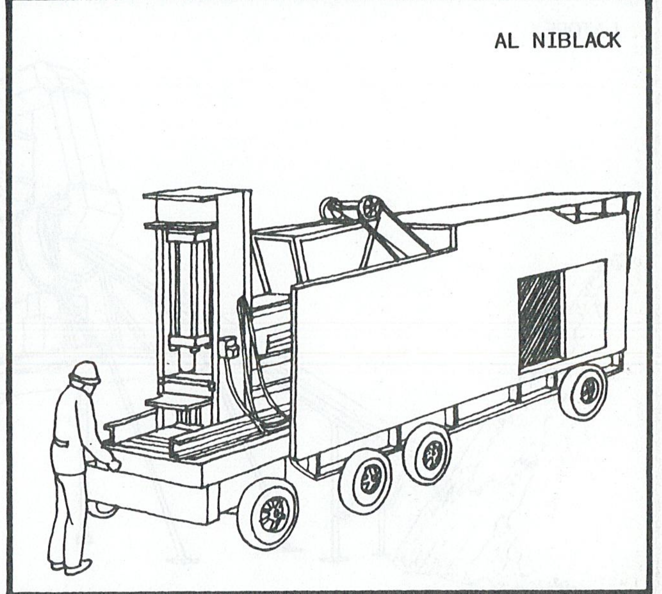
3 - TYPE 8 : PRESSES MECANIQUES

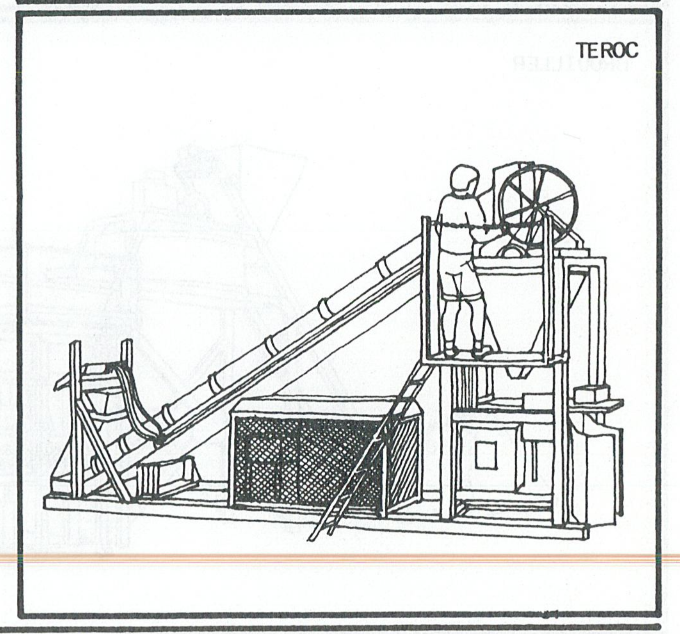
Une seule unité de ce genre est aujourd'hui connue. Sa conception fait appel à un mixage d'unités existantes, sur un même châssis : Unipress. Le matériel est en fait destiné à la fabrication de briques cuites et les tentatives pour son utilisation avec des blocs comprimés ont connu quelques problèmes majeurs, mais point insurmontables, en Egypte. Le matériel est très robuste.

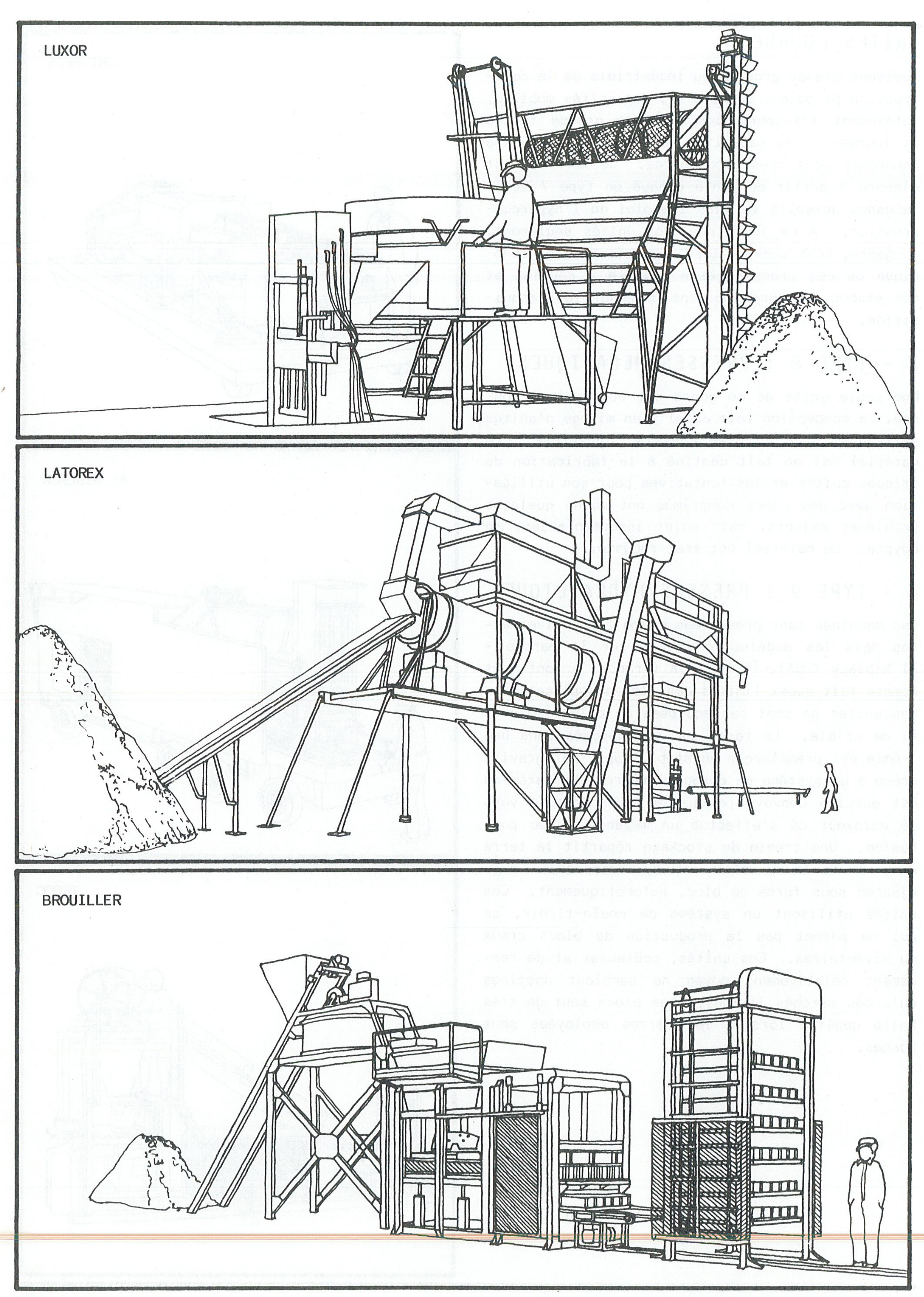
4 - TYPE 9 : PRESSES HYDRAULIQUES

Ces machines sont présentées comme très universelles mais les modèles existants sur le marché - Al Niblack (USA), Teroc T 1A (France) - sont tout compte fait assez limités dans leurs applications. Ces unités ne sont pas équipées de pulvérisateurs ni de crible. La terre qui est déposée dans une trémie est prémélangée au stabilisant, par gravité grâce à un système de dosage intégré. Le matériau est ensuite convoyé par bande transporteuse vers le malaxeur où s'effectue un mélange à sec puis humide. Une trémie de stockage répartit la terre dans le moule où elle est hypercompressée puis éjectée sous forme de bloc, automatiquement. Ces unités utilisent un système de moule-tiroir, ce qui ne permet pas la production de blocs creux ou alvéolaires. Ces unités, coûteuses et de rendement relativement moyen ne semblent destinés qu'à des marchés limités. Les blocs sont de très belle qualité lorsque les terres employées sont bonnes.


UNIPRESS


AL NIBLACK


TEROC


LUXOR
LATOREX
BROUILLER

Depuis plusieurs années, le marché a accueilli une gamme d'unités statiques de production, industrielles, totalement équipées et d'encombrement réduit. Ces unités industrielles fonctionnent sur le principe de la compression statique, simple ou double ou sur celui de la compression dynamique. Le catalogue des produits fabriqués n'est plus limité aux seuls blocs de dimensions réduites que fournissent la quasi-totalité des autres presses; on peut ainsi trouver toutes les formes de la gamme du parpaing de béton ou de la brique cuite qui peuvent être reproduites en terre stabilisée, y compris les blocs alvéolaires et les hourdis. Ce matériel de production vise encore un marché limité. Seul le contexte d'immenses programmes d'équipement immobilier peut assurer l'amortissement des investissements et un abaissement notoire des coûts de production des blocs. Ce genre de presse est aujourd'hui employé dans des pays tels que le Brésil, le Mexique, l'Algérie, le Gabon, le Nigéria, etc ...

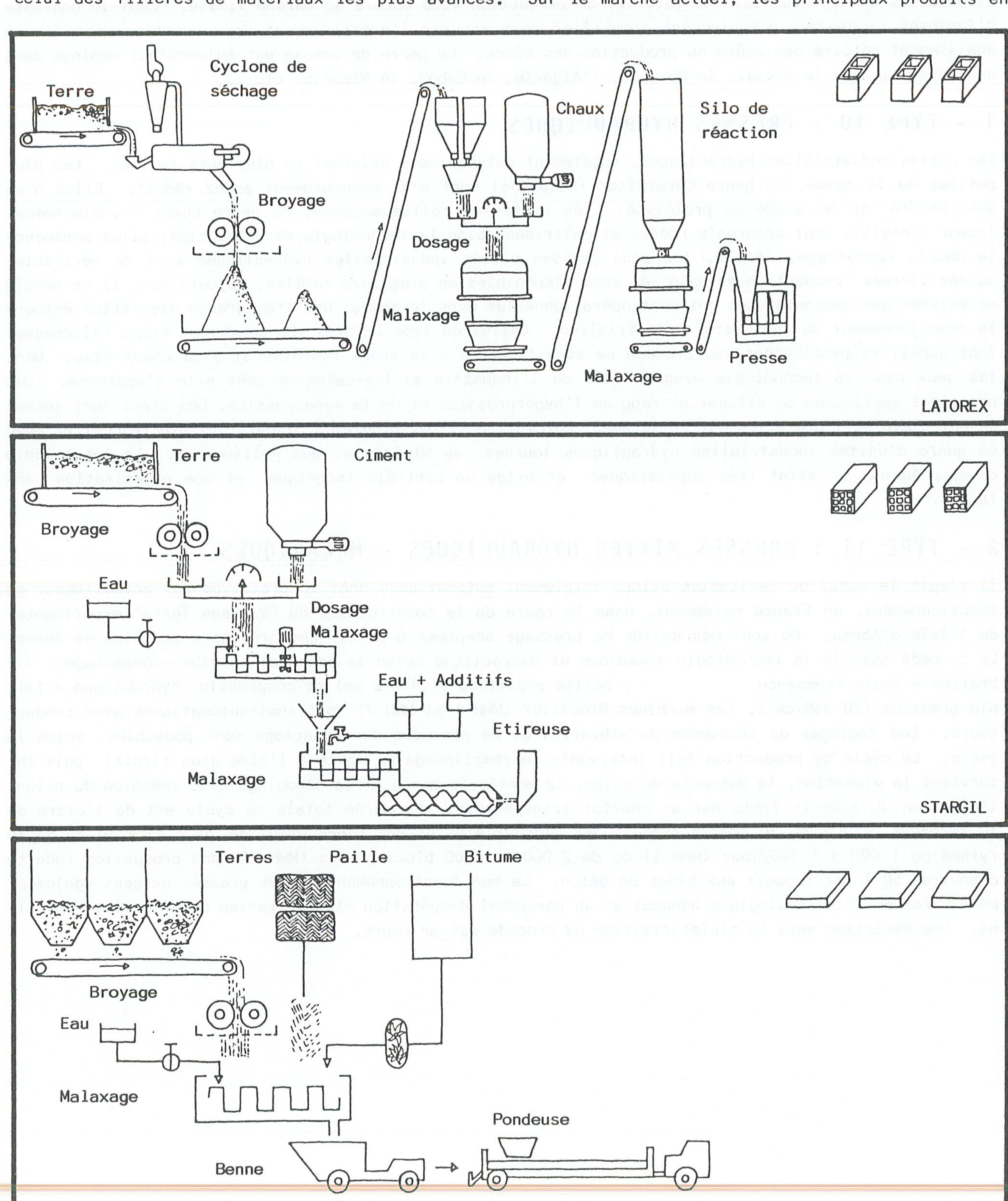
1 - TYPE 10 : PRESSES HYDRAULIQUES

Les unités industrielles hydrauliques, totalement automatisées existent en plusieurs tailles. Les plus petites de la gamme, du genre Ceramaster (Belgique) sont d'un encombrement assez réduit. Elles n'en sont encore qu'au stade de prototype. Les unités de taille moyenne, du genre Luxor - anciennement Tecmor (Brésil), sont désormais rodées et maîtrisent bien la technologie de production; elles emploient le double compactage. Enfin, les plus grosses unités industrielles hydrauliques sont de véritables usines livrées "production en main" et sont disponibles en plusieurs tailles. Aujourd'hui, il ne semble en exister que quelques unes qui sont opérationnelles dans le monde. Une très grande discrétion entoure le fonctionnement de ces unités industrielles. Celles du type Latorex (Danemark) et Krupp (Allemagne) font appel, respectivement, au procédé de stabilisation à la chaux hydratée et à la chaux vive. Dans les deux cas, la technologie évoque celle de l'industrie silico-calcaire dont elle s'approche. Les pressions appliquées se situent au rang de l'hyperpression et de la mégapression. Les blocs sont séchés en autoclave et l'opération est entièrement automatisée. Des problèmes majeurs ont été rencontrés avec ce genre d'unités industrielles hydrauliques lourdes, au Nigéria et aux Philippines. La technologie développée est en effet très sophistiquée et exige un contrôle technique et une organisation sans faille.

2 - TYPE 11 : PRESSES MIXTES HYDRAULIQUES - MECANIQUES

Il s'agit là aussi de véritables usines totalement automatisées dont un prototype est actuellement en fonctionnement, en France notamment, dans le cadre de la construction du "Village Terre" expérimental de l'Isle d'Abeau. Ce sont des unités de pressage adaptées à partir des presses à parpaing de béton. Le procédé associe la technologie mécanique et hydraulique selon le principe du vibro-compactage : vibration à haute fréquence , petite amplitude (1,5 à 2 mm) et compression hydraulique à faible pression (20 daN/cm²). Les machines Brouiller (MMH 1 et MMH 7) sont semi-automatiques avec conducteurs. Des réglages de fréquence de vibration et de pression de compactage sont possibles, selon la terre. Le cycle de production fait intervenir le remplissage du moule à l'aide d'un tiroir; puis intervient la vibration, la descente du pilon, la montée du moule et le démoulage avec remontée du pilon, l'éjection du produit frais par un chariot transporteur. La durée totale du cycle est de l'ordre de 40 secondes. Ce type de presse produit des blocs pleins et des blocs creux de 20 x 20 x 40 ou 50 au rythme de 1 000 à 1 500/jour (MMH 1) ou de 2 000 à 2 500 blocs pleins (MMH 7), une production réduite d'environ 50 % par rapport aux blocs de béton. Le bon fonctionnement de ces presses exigent également un environnement technologique adéquat et un personnel d'opération et d'entretien bien formé et entraîné. Une évolution vers la miniaturisation du procédé est en cours.

La construction en terre fait désormais l'objet d'une véritable tendance à l'industrialisation. Cette tendance est autant sensible sur le plan des techniques employées qu'à celui des degrés de mécanisation développés, ainsi que pour le très large catalogue de produits et composants de construction proposé qui égale celui de l'industrie céramique ou du bloc de béton. Cette tendance à l'industrialisation de la terre est assez récente et connaît son début vers les années 60. Des usines de préfabrication, livrées "production en main", existent, avec un degré de sophistication élevé qui n'a rien à envier à celui des filières de matériaux les plus avancés. Sur le marché actuel, les principaux produits en



terre industriels sont d'une part les blocs comprimés, pleins ou creux et de toutes formes, les briques extrudées et l'asphadobe ou bitudobe. Ces produits sont conçus comme des composants usuels du gros oeuvre de la construction, destinés à la mise en oeuvre de murs mais aussi de planchers, ou comme des composants usuels du second oeuvre, employés en parement de murs, en décoration, en revêtement de sol, et en composants de couverture. Les recherches très nombreuses sur le matériel de production, sur la stabilisation, augurent d'un élargissement considérable des applications dans le domaine d'une véritable création industrielle "Terre".

BLOCS COMPRIMES

Les usines les plus représentatives pour ce type de produits sont celles des groupes Latorex et Krupp. Le procédé de production est hérité de l'industrie silico-calcaire. Le matériau brut de base est la latérite et le stabilisant la chaux. Ces usines visent une optimisation maximale de chaque stade de production: séchage du matériau brut, dosage, malaxage, réaction au stabilisant, trituration, compression, cure en autoclave et séchage final, pallétisation.

ORIGINE	: Danemark	Allemagne
CONSTRUCTEUR	: Latorex	Krupp
INVESTISSEMENT	: 800 000 US $	1 500 000 US$
PRODUCTION	: 5 tonnes/h	18 tonnes/h

BRIQUES EXTRUDEES

La production de composants alvéolaires de terre crue extrudés est aujourd'hui opérationnelle. Les procédés ont été notamment développés en France, à l'Insa de Rennes (Stargil) et au C.T.T.B. (Simarex). La filière fait appel à toute l'installation de production d'une briqueterie moderne, exceptés le four et les chambres de séchage artificiel. La terre est mélangée à du ciment pour former une pâte de base ajoutée de plastifiants (mélasse). Cette pâte est étirée et extrudée, transformée en briques creuses. L'absence de cuisson permet de réaliser une économie d'énergie de 40 à 65 % par rapport à la brique cuite. Deux usines sont aujourd'hui opérationnelles en France.

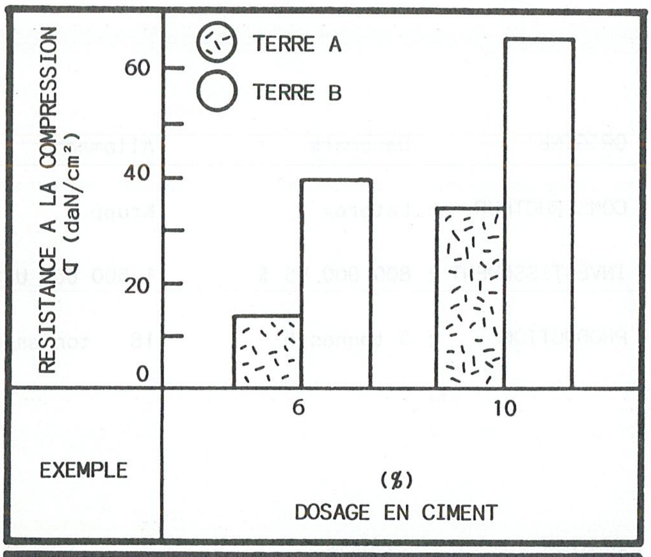
ORIGINE	: France
CONSTRUCTEUR	: Chaffoteau et Maury
INVESTISSEMENT	: 2 000 000 US $
PRODUCTION	: 7 tonnes/h

ASPHADOBE

La production de briques d'adobe stabilisées au bitume a fait l'objet d'une mécanisation très poussée, notamment aux USA. La fabrique Hans Sumpf en Californie(Fresno) est la plus célèbre et fonctionne depuis des dizaines d'années. La machine pondeuse qui fut imaginée dès le début de ce siècle peut produire de 10 000 à 20 000 blocs/jour. Une centrale de production, en amont, est entièrement automatisée. Ce type d'unité de production se multiplie et a même été exporté (Soudan).

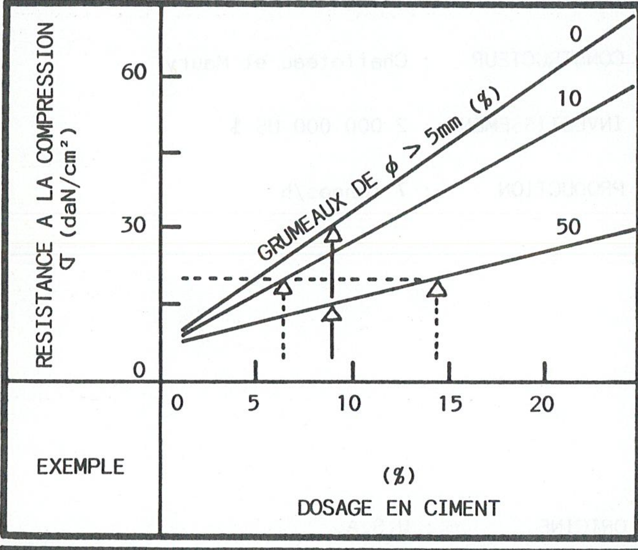
ORIGINE	: U.S.A.
CONSTRUCTEUR	: Hans Sumpf Corporation
INVESTISSEMENT	: 300 000 US $
PRODUCTION	: 20 tonnes/h

On observe une tendance générale, dans le discours sur la terre, à donner une vision simpliste de la question : prendre de la terre, la comprimer ou la mouler et c'est fini. Ce genre d'affirmation qui peut satisfaire l'autoconstructeur profane ne doit pas pour autant le tromper et devient intolérable dans le cadre de projets d'envergure. Il convient de souligner que les paramètres de production ont une influence considérable sur la qualité du produit, sur les rendements et sur l'économie. L'optimalisation de la production peut être décisive pour l'acceptabilité et la faisabilité économique du pro-



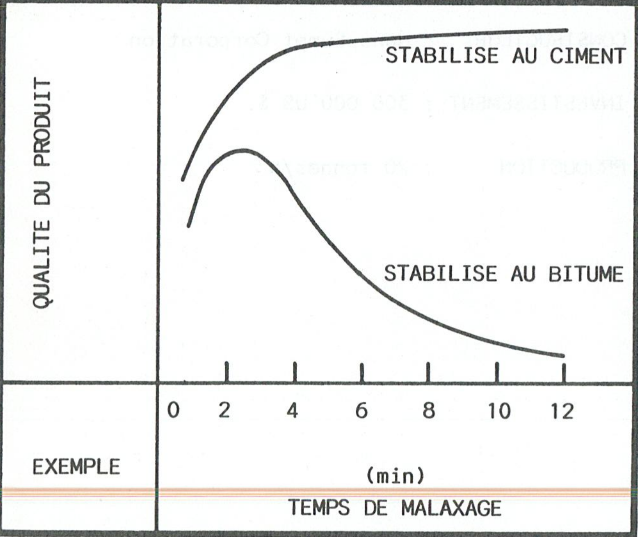
1 - CHOIX DE LA TERRE

Les résultats de qualité du produit obtenus avec des terres correctement choisies, voire amendées, sont très supérieurs à ceux que permettent une terre médiocre. De même, la stabilisation est optimisée avec une bonne terre pour des pourcentages de stabilisant très inférieurs à ceux qu'exigent une mauvaise terre. La stabilisation d'une terre médiocre n'est pas une solution panassée ni miracle. Choisir une bonne terre n'implique pas forcément un éloignement de la carrière mais une reconnaissance, sur place, de la meilleure terre disponible.



2 - PULVERISATION

Dans le cas de la production de blocs de terre comprimés stabilisés, la pulvérisation est indispensable pour optimiser le dosage du stabilisant et donc faciliter la production et assurer une économie du produit. La pulvérisation de la terre, en amont du pressage, peut permettre de réduire de moitié, voire plus, la quantité de stabilisant tout en assurant une qualité excellente du produit. A qualité de stabilisant égale, une pulvérisation de la terre peut assurer une qualité deux fois supérieure.



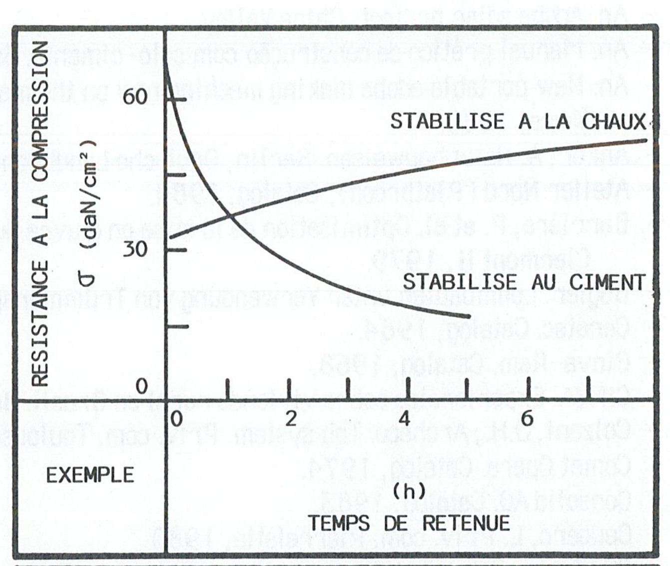
3 - TEMPS DE MALAXAGE

Suivant le matériel ou le mode de malaxage employé, les temps d'opération varient considérablement. Mais, il a été constaté maintes fois qu'un temps de malaxage minimal doit être impérativement respecté. Par exemple, pour les blocs stabilisés au ciment, ce temps de malaxage minimal est de 3 à 4 minutes sous risque, s'il est inférieur, de perdre 20 % d'efficacité de la stabilisation. Pour l'adobe stabilisé au bitume, il y a un temps de malaxage optimal au-dessus et au-dessous duquel on perd beaucoup en efficacité.

duit. Il n'est pas pour cela nécessaire de mécaniser ou de sophistiquer la technique, ni d'investir à outrance. Bien plus important est le savoir-faire qui n'est pas forcément dû à l'expérience mais plutôt à la qualité de la formation reçue et à une bonne synthèse des résultats de recherche. Il s'agit également d'appliquer au procès de production un ensemble de critères de choix raisonnés qui doivent permettre d'optimiser la qualité du produit, d'amoindrir les coûts et la complexité du procès de production.

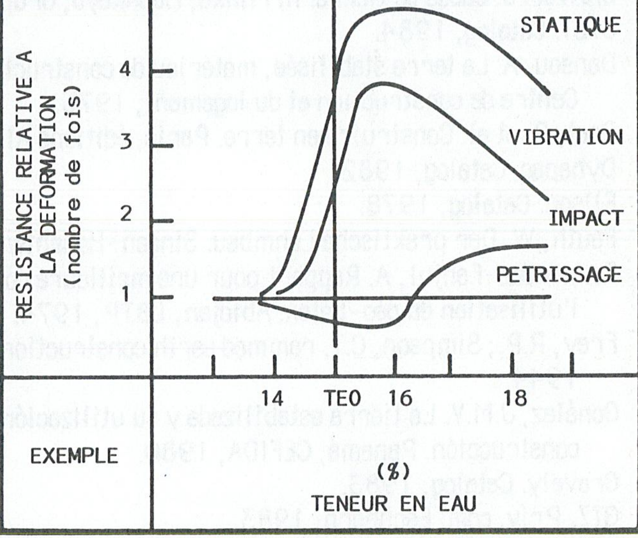
4 - TEMPS DE RETENUE

Le temps qui s'interpose entre le malaxage et le moulage peut être très important. Par exemple, pour les blocs de terre comprimés stabilisés au ciment, ce temps de retenue doit être réduit au minimum sous risque de favoriser une prise anticipée du ciment et la création de concrétions qui seront néfastes à la résistance mécanique des blocs. Un délai de 1 à 2 heures peut faire chuter la qualité du produit de moitié. Par contre, pour la stabilisation à la chaux, ce temps de retenue plus long (réaction aérienne lente de la chaux) améliore la qualité des blocs. Le temps de retenue influence l'organisation de la production.



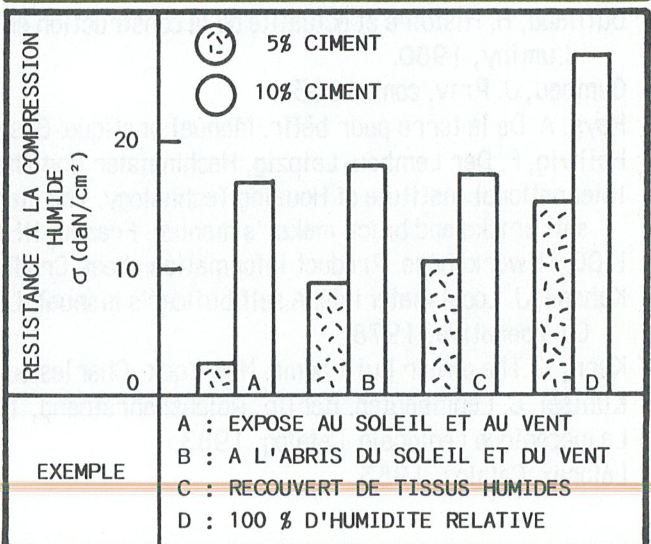
5 - MODE DE MOULAGE

L'influence du mode de moulage ou du mode de compactage est très importante sur la résistance finale du matériau à la déformation (5 %). Dans certaines circonstances, le moulage à la presse peut améliorer de 5 fois la résistance à la déformation vis-à-vis d'un moulage manuel au pilon. Dans d'autres cas, on peut trouver que c'est le moulage par pétrissage qui donne des résultats supérieurs. Il importe donc de choisir la technique de moulage en connaissance de cause.



6 - MODE DE SECHAGE

Dans de mauvaises conditions de séchage, une réduction dramatique de la qualité est notoire pour des blocs faiblement stabilisés au ciment. Pour une forte stabilisation, près de 2/3 de la résistance utile peut être conservée. Mais on peut quasiment atteindre la même qualité avec la moitié du ciment si les conditions de séchage sont optimisées. Les conditions de séchage sont encore plus importantes pour une stabilisation à la chaux. Trop de briqueteries opérationnelles négligent la phase de séchage.



- Adeten. Etude et expérimentation de la construction en terre à Vigneu. Grenoble, UPAG, 1976.
- AGRA. Recherche terre. Grenoble, AGRA, 1983.
- AGRA. Recommandations pour la conception des bâtiments du village terre. Grenoble, AGRA, 1982.
- Altech. Catalog, 1984.
- An. Adobe solar project. China Valley.
- An. Manual prático de construção com solo-cimento. Salvador, CEPED, 1978.
- An. New portable adobe making machine now on the market. In Adobe News, Albuquerque, Adobe News, 1980.
- Anker, A. Naturbauweisen. Berlin, Deutsche Landbuchhandlung, 1919.
- Atelier Nord (Platbrood), Catalog, 1984.
- Barrière, P. et al. Optimisation de la mise en œuvre du pisé. Clermont-Ferrand, Université Clermont II, 1979.
- Bogler. Lehmbauten unter Verwendung von Trümmersplitt. In Naturbauweisen, Berlin, 1948.
- Ceratec. Catalog, 1984.
- Cinva-Ram. Catalog, 1968.
- CINVA. Experiencias sobre vivienda rural en Brasil. Bogota, CINVA, 1961.
- Colzani, J.H.; Archéco. Tob system. Priv. com. Toulouse, 1983.
- Comet Opera. Catalog, 1974.
- Consolid AG. Catalog, 1983.
- Couderc, L. Priv. com. Pierrelatte, 1980.
- CRATerre. Casas de tierra. In Minka, Huankayo, Grupo Talpuy, 1982.
- CTBI. Catalog, 1984.
- Dansou, A. La terre stabilisée, matériau de construction. In bulletin d'information, Lome, Centre de construction et du logement, 1975.
- Doat, P. et al. Construire en terre. Paris, éditions Alternatives et Parallèles, 1979.
- Dynapac. Catalog, 1982.
- Ellson. Catalog, 1978.
- Fauth, W. Der praktische Lehmbau. Singen-Hohentwiel, Weber, 1948.
- Fernandez-Fanjul, A. Rapport pour une meilleure connaissance du comportement et de l'utilisation du géo-béton. Abidjan, LBTP, 1974.
- Frey, R.P.; Simpson, C.T. rammed earth construction. Saskatoon, University of Saskatchewan. 1944.
- Gonález, J.M.V. La tierra estabilizada y su utilización en la producción de componentes para la construcción. Panamá, CEFIDA, 1980.
- Gravely. Catalog, 1983.
- GTZ. Priv. com. Eschborn, 1983.
- Guillaud, H. Histoire et actualité de la construction en terre. Marseille, UPA Marseille -Luminy, 1980.
- Gumbau, J. Priv. com. 1983.
- Hays, A. De la terre pour bâtir. Manuel pratique. Grenoble, UPAG, 1979.
- Hellwig, F. Der Lembau. Leipzig, Hachmeister und Thal, 1920.
- International Institute of Housing Technology. The manufacture of asphalt emulsion stabilized soil bricks and brick maker's manual. Fresno, IIHT, 1972.
- ITDG. IT workshops. Product information sheet. Cradley Heath, ITDG, 1983.
- Kahane, J. Local materials. A self builder's manual. London, Publication Distribution Co-operative, 1978.
- Kern, K. The owner built home. New York, Charles Scribner's Sons, 1975.
- Küntsel, C. Lehmbauten. Berlin, Reichsnährsthand, 1919.
- La mécanique régionale. Catalog, 1983.
- Latorex. Catalog, 1983.

- LBTP. Etude de la presse Cinva-Ram, étude de l'influence de la compaction sur la qualité du géobéton. Abidjan, LBTP.
- Les Atelier de Villers-Perwin. Catalog, 1977.
- Liner. Catalog, 1974.
- Lunt, M.G. Stabilised soil blocks for building. In overseas buiding notes, Garston, BRE, 1980.
- Luxor. Catalog, 1984.
- Lyon, J.; Lumpkins, W. Large scale manufacturing of stabilized adobe brick, Self Help Inc, Los Alamos, 1969.
- Maggiolo, R. Construcción con tierra. Lima, Comissión ejecutiva inter-ministerial de cooperacion popular, 1964.
- Markus, T.A. et al. Stabilised soil. Glasgow, University of Strathclyde, 1979.
- Meili. Catalog, 1983.
- Meynadier. Catalog, 1981.
- Miller, L.A. & D.J. Manual for building a rammed earth wall. Greeley, REII, 1980.
- Miller, T. et al. Lehmbaufibel. Weimar, Forschungsgemeinschaften Hochschule, 1947.
- Minke, G. Alternatives Bauen. Kassel, Gesamthochschul-Bibliothek, 1980.
- Morando. Catalog, 1977.
- Moriarty, J.P. et al. Emploi du pisé dans l'habitat économique. In Bâtiment International, Paris, CIB, 1975.
- MTD. Catalog, 1982.
- Muller. Catalog, 1979.
- Musick, S.P. The caliche report. Austin, Center for maximum potential, 1979.
- Perin, A. Priv. com. Marseille, 1983.
- Pliny Fisk. Earth block manufacturing and construction techniques. 2nd regional conference on earthen building materials, Tucson, University of Arizona, 1982.
- Pollack, E.; Richter, E. Technik des Lehmbaues. Berlin, Verlag Technik, 1952.
- PPB SARET. Catalog, 1983.
- Proctor, R.L. Earth systems. Priv. com. Corrales, 1984.
- Quixote. Catalog, 1982.
- Reuter, K. Lehmstakbau als Beispiel wirtschaftlichen Heimstättenbaues. In Bauwelt, 1920.
- Riedter. Catalog, 1983.
- Ritgen, O. Volkswohnungen und Lehmbau. Berlin, Wilhelm Ernst und Sohn, 1920.
- Rock. Catalog, 1978.
- Shaaban, A.C.; Al Jawadi, M. Construction of load bearing soil cement wall. Bagdad, BRC. 1973.
- Simonnet, J. Définition d'un cahier des charges pour la conception d'une presse manuelle à géobéton destinée à la Côte d'Ivoire. Abidjan, LBTP, 1983.
- Smith, E. Adobe bricks in New Mexico. Socorro, New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, 1982.
- Sonke, J.J. De noppensteen. Amsterdam, TOOL, 1977.
- Souen. Catalog, 1983.
- Sulzer, H.D.; Meier, T. Economical housing for developing countries. Basel, Prognos, 1978.
- Tecmor. Catalog, 1982.
- Tibbets, J.M. The pressed block controversy. In Adobe Today, Albuquerque, Adobe News, 1982.
- Torsa. Catalog, 1978.
- Trueba, G. Priv. com. Mexico, 1983.
- Venkatarama Reddy, B.V.; Jagadish, K.S. Pressed soil blocks for low-cost buildings. Bangalore, ASTRA, 1983.
- Webb, D.J.T. Stabilized soil construction in Kenya. In Colloque L'habitat économique dans les PED, Paris, Presses Ponts et Chaussées, 1983.
- Webb, D.J.T.; BRE. Priv. com. Garston, 1983.
- Williams-Ellis, C.; Eastwick-Field, J. & E. Building in earth, pisé and stabilized earth. London, Country Life, 1947.
- Wolfe, A. Tallahassee. Priv. com. Florida A & M university.

1000 ELEMENTS DE CONCEPTION

Le principal inconvénient de la construction en terre est la rapide dégradation de ce matériau sous l'action des intempéries.

Pourtant dans l'architecture vernaculaire, les constructeurs, aussi bien de constructions banales que de constructions monumentales, ont su trouver les astuces nécessaires pour donner une durabilité maximale à leurs bâtiments avec les moyens locaux.

Beaucoup de ces astuces cependant sont tombées dans l'oubli; soit elles n'ont pas été comprises par les techniciens et ont donc été éliminées par déconsidération; soit elles n'ont tout simplement pas été remarquées et n'ont donc pas été retenues.

Le résultat de cette situation est que la technologie de la construction en terre s'est partiellement dégradée. De plus, ce qui était une solution valable hier, ne l'est peut-être plus aujourd'hui car les situations sociales ont changé.

Les techniques qui font appel à un entretien régulier sont souvent rejetées car n'étant plus acceptables dans un contexte différent.

Il existe pourtant maintes solutions aux problèmes constructifs relatifs à la nature même de la terre,à tel point qu'on est parfois embarrassé quant au choix.

Ces solutions devraient permettre de prendre des décisions rapides, pertinentes et économiques et de rendre les constructions en terre plus durables et plus sûres.

PRESENCE D'EAU DANS LE BATIMENT

Par rapport aux autres types de constructions, celles bâties en terre sont particulièrement sensibles aux actions de l'eau. Lorsque l'eau séjourne à proximité du bâtiment ou y pénètre, celui-ci devient inconfortable, voire malsain et risque de se dégrader rapidement.

Pour que l'eau agisse, trois conditions doivent être réunies :

1 - Présence de l'eau à la surface du bâtiment;

2 - Présence d'une ouverture dans cette surface qui permet à l'eau de s'introduire : fissure, fenêtre p.e.

3 - Action d'une force - pression, gravité, capillarité - qui fait pénétrer l'eau dans l'ouverture.

L'élimination de ces conditions favorisant l'action néfaste de l'eau garantit une situation saine et éloigne le risque d'une dégradation du bâtiment du fait d'une pathologie humide. Mais ceci n'est pas toujours aisé. Il est possible de réduire l'action de l'eau sur les murs en construisant de bonnes fondations et en élevant des soubassements, en protégeant le haut des murs, en supprimant les risques de condensation de surface. Il est aussi possible de colmater les fissures ou les voies de pénétration de l'eau à la surface des murs par un entretien régulier de la peau de la maison. Mais l'on ne doit surtout pas imperméabiliser la surface des murs de terre qui ont besoin avant tout de respirer, d'être perméables aux migrations de vapeur d'eau. On peut aussi agir sur les forces de pénétration de l'eau mais ces interventions sont parfois délicates (capillarité du matériau p.e.).

La meilleure stratégie et la plus efficace consiste à éloigner l'eau des parties sensibles du bâtiment, c'est à dire des murs de terre. On comprend alors le sens d'un dicton populaire : "Une maison en terre ne demande qu'un bon chapeau et de bonnes bottes". Bien construire en terre en évitant le risque de pathologie humide peut être résumé à cet habillage élémentaire des maisons. Que l'eau frappe la surface des murs (pluie p.e.) pour ensuite s'évaporer, cela n'est pas très grave. Mais que l'eau pénètre dans la masse des murs de terre, y stagne, cela est très grave.

PRECAUTIONS

La pathologie humide typique peut être évitée par une bonne démarche de conception et de réalisation du bâtiment en terre. Il s'agit en effet de "savoir bien construire en terre". On constate malheureusement que ce savoir bien construire a tendance à être éclipsé par une volonté de blinder le bâtiment, qui vise à accroître la résistance à l'eau de "la terre" (surprotection du matériau) et qui ignore la bonne démarche consistant à rendre le "bâtiment" résistant à l'eau.

Les actions les plus typées de l'eau sont résumées par le système de la goutte d'eau : impact, ruissellement, stagnation, absorption, infiltration, rejaillissement. L'humidité, qui est un second stade de l'action de l'eau, agit de façon plus malsaine : par perméabilité, par capillarité. Ces actions sont d'autant plus fortes que le matériau est d'une porosité élevée.

Les points les plus fragiles des constructions en terre et qui offrent le plus de faiblesses aux actions de l'eau et de l'humidité sont :

- la base des murs;
- le haut des murs.

Il existe également d'autres points faibles localisés tels que tableaux d'ouvertures, acrotères de terrasses, gargouilles, liaisons de matériaux différents : bois/terre p.e. Ce sont là les points qu'il conviendra de bien soigner et d'entretenir régulièrement.

MECANISMES, EFFETS

- 1 - Fondations : les remontées capillaires, à la base des murs, depuis les fondations, ont plusieurs origines : fluctuations saisonnières de la nappe phréatique, rétention d'eau par des racines d'arbustes, tuyauteries d'évacuation d'eaux vannes détériorées, absence de drainage du bâtiment, stagnation d'eau au pied des murs. Un état humide durable peut entraîner un affaiblissement de la base des murs : le matériau passe de l'état solide à l'état plastique et les murs ne supportent plus les charges : risque d'effondrement. L'humidité favorise le développement d'efflorescences salines - NaCl, $CaSO_4$, $NaSO_4$ - qui attaquent le matériau : creusement de cavités. Une faune d'insectes et de rongeurs attirés par l'humidité peuvent aggraver le minage du mur.

- 2 - Soubassements: au-dessus du terrain naturel, la base des murs peut être minée par : le rejaillissement de gargouilles, la protection de flaques au passage de véhicules, le lavage des sols intérieurs, la condensation de surface (rosée matinale), un ruissellement au pied du mur (caniveau trop proche), une imperméabilisation de surface (trottoir, enduit étanche) qui empêche l'évaporation ou qui favorise un point de rosée entre le mur de terre et l'enduit imperméable, le développement d'une flore parasite (mousses) et d'efflorescences.

- 3 - Mur courant : l'eau s'infiltre par les fissures structurales(tassement différentiel, cisaillement p.e.) et les fissures de retrait dues aux cycles répétés de mouillage-séchage, par les trous de clés de banche non rebouchés, par les joints de mortier dégradés : capillarité, creusement du mur.

- 4 - A la liaison des tableaux d'ouvertures et des murs de terre, l'eau ruisselle (appui,linteau) et s'infiltre entre la maçonnerie du tableau ou le cadre en bois et la terre : dégradations localisées.

- 5 - La pluie et les variations de températures peuvent entraîner une décomposition du matériau : délavage des argiles qui réduit la cohésion de la terre.

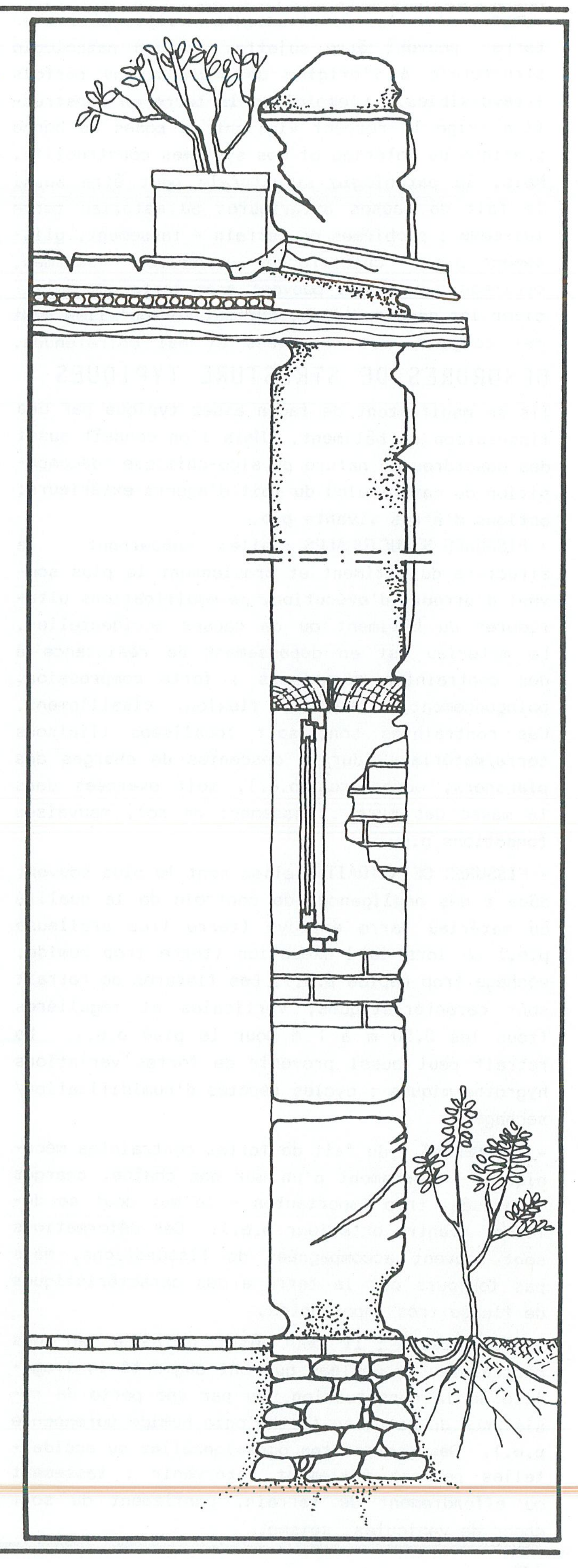
- 6 - Lorsque le mur de terre est revêtu d'un enduit étanche aux migrations de vapeur d'eau, la condensation en mur froid (été : mur intérieur, hiver : mur extérieur) ou un point de rosée entre le mur et l'enduit dégradent le mur.

- 7 - Le passage des poutres de plancher ou de toiture à travers les murs de terre peut occasionner des infiltrations localisées.

- 8 - Au passage des gargouilles mal conçues et non protégées à leur entrée et à leur sortie,l'eau ruisselle, s'infiltre. Les gargouilles peuvent être bouchées par une accumulation de terre: stagnation de l'eau, absorption, capillarité.

- 9 - Les acrotères non protégés par un chapeau débordant ou fissurés,revêtus d'un enduit dégradé, favorisent le ruissellement et l'infiltration de l'eau. Des objets posés contre les acrotères, des plantes que l'on arrose, un mauvais drainage des terrasses favorisent une rétention d'eau et d'humidité.

- 10 - Les terrasses fissurées et les revêtements dégradés favorisent l'infiltration.



Comme toutes les constructions, celles bâties en terre peuvent être sujettes à une pathologie structurale à l'origine de dégradations parfois irréversibles. L'emploi de la terre en construction exige le respect vigilant de codes de bonne pratique du matériau et des systèmes constructifs. Mais, la pathologie structurale peut être aussi le fait de causes extérieures au matériau terre lui-même : problèmes de terrain - tassement, glissement p.e. - catastrophes naturelles - séismes, cyclones p.e. - qui peuvent très fortement solliciter les constructions, surtout lorsqu'elles sont mal conçues, mal exécutées et mal entretenues.

DESORDRES DE STRUCTURE TYPIQUES

Ils se manifestent de façon assez typique par une fissuration du bâtiment. Mais l'on connaît aussi des désordres de nature physico-chimique (décomposition du matériau)ou du fait d'agents extérieurs: actions d'êtres vivants p.e.

- **FISSURES STRUCTURALES** : elles concernent la structure du bâtiment et proviennent le plus souvent d'erreurs d'exécution, de modifications ultérieures du bâtiment ou de causes accidentelles. Le matériau est en dépassement de résistance à des contraintes mécaniques : forte compression, poinçonnement, traction, flexion, cisaillement. Ces contraintes sont soit localisées (liaisons terre/matériaux "durs", descentes de charges des planchers, ouvertures p.e.), soit exercées dans la masse des murs : tassement de sol, mauvaises fondations p.e.

- **FISSURES DE RETRAIT** : elles sont le plus souvent dûes à des négligences de contrôle de la qualité du matériau terre employé (terre trop argileuse p.e.) ou lors de l'exécution (terre trop humide, séchage trop rapide p.e.). Les fissures de retrait sont caractéristiques, verticales et régulières (tous les 0,50 m à 1 m pour le pisé p.e.). Le retrait peut aussi provenir de fortes variations hygrothermiques : cycles répétés d'humidification/ séchage.

- **FLAMBEMENT** : du fait de fortes contraintes mécaniques - élancement d'un mur non chaîné, charges localisées trop importantes - le mur peut se déformer (ventre extérieur p.e.). Ces déformations sont souvent accompagnées de fissurations, mais pas toujours car la terre a des caractéristiques de fluage très importantes.

- **EFFONDREMENT** : il peut être provoqué par des contraintes accumulées qui ont augmenté la fragilité de la construction, ou par une perte de résistance du matériau (pathologie humide permanente p.e.). Des contraintes occasionnelles ou accidentelles peuvent également intervenir : tassement ou effondrement de terrain, gonflement du sol, chocs de véhicules, séisme.

- **DECOMPOSITION DU MATERIAU** : sous l'action de l'eau, de l'humidité, de fortes chaleurs, du gel, le matériau peut évoluer dans sa structure chimique et minéralogique, perdre sa cohérence et se désagréger. La fixation de parasites organiques et de sels fait évoluer la structure du matériau.

PRINCIPALES CAUSES DE DESORDRES STRUCTURELS

- Sollicitation du matériau à l'encontre de ses caractéristiques : en traction ou en flexion p.e. La terre ne travaille bien qu'en compression. Les autres efforts nécessitent l'emploi d'autres matériaux : bois, béton, acier (chaînages,linteaux p.e.).
- Forte pathologie humide qui amoindrit la résistance du matériau, même en compression.
- Construction sur un mauvais terrain qui ne résiste pas aux charges transmises ou sur un terrain mouvant (glissement, tassement differentiel, gonflement).
- Mauvaise conception du bâtiment : fondations sous-dimensionnées, excentrées, murs non raidis, non chaînés, trop élancés, trop percés d'ouvertures, réalisés en matériau composites; surcharges de planchers, de toitures, d'occupation, poinçonnements localisés; systèmes constructifs inadaptés au matériau terre.
- Mauvaise mise en oeuvre : matériau de mauvaise qualité (mauvaise terre, mauvaises briques p.e.); systèmes constructifs mal exécutés (erreurs de calepinage, coups de sabre p.e.); mortier mal dosé; ouvertures mal dimensionnées, absence de chaînage; pas de protection basse et haute des murs p.e. (pathologie humide).
- Causes annexes : influences climatiques (action du vent sur un terrain de pathologie humide, arrachement de matériau p.e.). Action d'êtres vivants: parasites végétaux (mousses, lichens), rongeurs, insectes (termites).

PATHOLOGIE STRUCTURALE: ILLUSTRATIONS

- 1 - Fondations : il y a risque de pathologie structurale lorsque les constructions sont établies sur des terrains instables ou peu résistants (sols hétérogènes, sols rapportés, sols sujets au gonflement ou au tassement p.e.). Le risque est accru lorsque les fondations sont sous-dimensionnées, pas assez résistantes ou excentrées par rapport aux charges, mal construites(coup de sabre dans les fondations en pierre ou béton cyclopéen mal exécuté p.e.), mal drainées (humidité et affouillement). Les racines d'arbres trop proches, les travaux de jardinage au pied des murs, les insectes et les rongeurs (surtout quand les fondations sont en terre et déjà attaquées par une pa-

thologie humide) peuvent miner les fondations et augmenter la fragilité des murs au point de causer à terme, leur effondrement.

- 2 - Soubassement : au-dessus du terrain naturel, la base des murs est notamment exposée à l'action de l'eau. Sur un terrain de pathologie humide qui affaiblit la résistance des murs, qui peut diminuer la cohésion du matériau, le vent, les végétaux parasites, les dépôts de sels solubres, les rongeurs et insectes, peuvent aggraver le minage de la base des murs déjà entamée. Le soubassement est aussi exposé aux heurts accidentels de véhicules, de bestiaux, ou résultats de travaux périodiques (voirie, agriculture p.e.).

- 3 - Une mauvaise exécution des murs de terre peut considérablement affaiblir la structure du bâtiment; p.e., pour le pisé, l'absence de calepinage des banchées (joints superposés ou pas assez décalés) crée des fissures de coup de sabre. Les emplacements de clefs de banches, non rebouchés affaiblissent les murs,favorisent la nidation d'animaux et d'insectes qui attaquent le matériau. Une variation dans les terres employées, un compactage irrégulier, peut occasionner une variation de densité des couches compactées, un poinçonnement ou un laminage du matériau. Une teneur en eau trop inférieure à l'optimal peut réduire la cohésion du matériau; trop supérieure à l'optimal, les fissures de retrait prolifèrent.

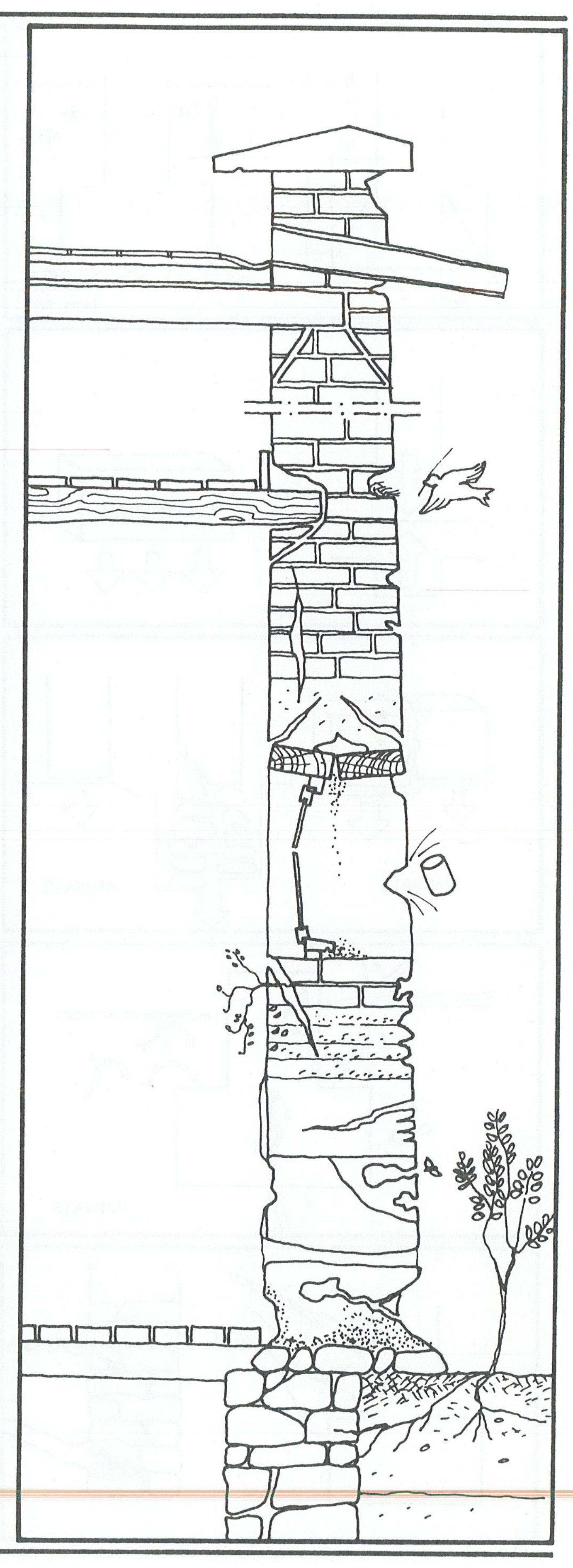
- 4 - Au droit des ouvertures,les descentes de charges peuvent cisailler les allèges (fissures verticales à l'aplomb des jambages). Les linteaux mal conçus peuvent fléchir et occasionner des fissures qui affaiblissent le mur.

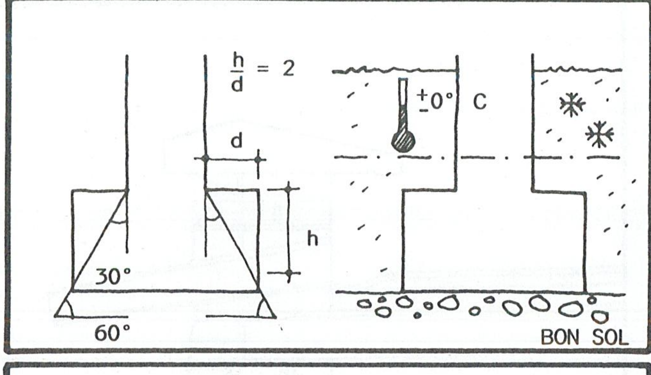
- 5 - Des murs en briques mal appareillés ou construits avec des briques de qualité, de taille et de résistance différentes, bâties avec un mauvais mortier (faible adhérence brique/mortier p.e.), sont plus fragiles et peuvent fissurer.

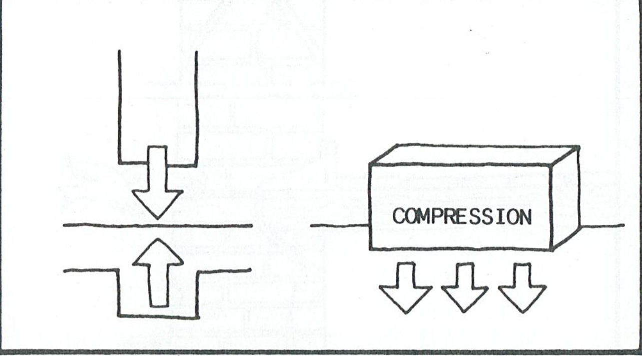
- 6 - Un mauvais ancrage des poutres de plancher (pénétration insuffisante p.e.) ou l'absence de dispositif de répartition des charges localisées (planche en bois ou stabilisation p.e.) peuvent favoriser un poinçonnement, une fissuration ou une rupture du matériau.

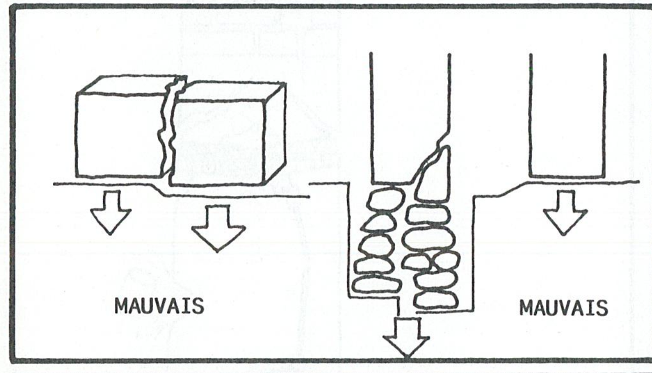
- 7 - Les charges de toiture non reprises par un chaînage fissurent le mur.

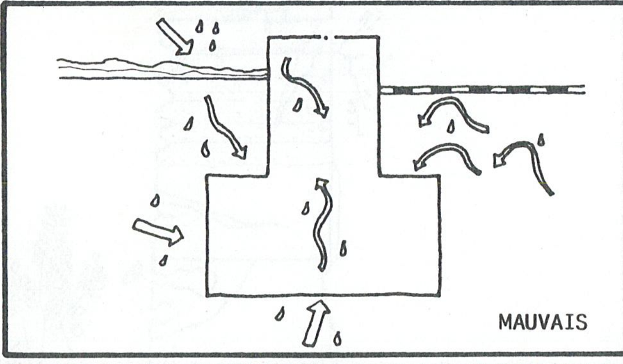
- 8 - Un mauvais traitement des gargouilles et une protection déficiente de l'acrotère entraîne une pathologie structurale sur terrain humide.

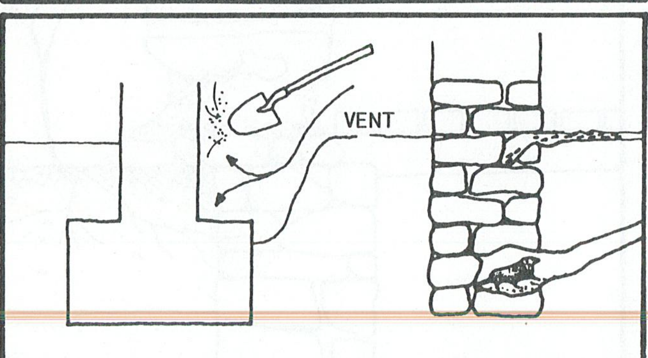












PRINCIPES GENERAUX DE CONCEPTION

Les constructions en terre crue en murs massifs à éléments (briques d'adobe, blocs comprimés) ou monolithiques (bauge, pisé), sont assimilables à de la maçonnerie classique. Ce sont des ouvrages lourds qui sont bâtis sur des fondations superficielles (semelles) ou semi-profondes (longrines, puits) dont la conception répond aux règles de calcul connues. Les systèmes de fondations classiques ainsi que les matériaux qui les composent conviennent assez bien.

Les fondations doivent être suffisamment profondes pour :

- être construites sur le bon sol. Faire particulièrement attention aux sols expansifs ou à fort tassement;
- être protégées de l'eau de surface et de l'humidité;
- être mises hors gel;
- être protégées de l'érosion éolienne qui peut affouiller les fondations (dans le cas de fortes tempêtes);
- être protégées de travaux dans leur voisinage (voirie, jardinage, agriculture);
- être protégées des rongeurs et insectes (termites p.e.).

CONTRAINTES ET PROBLEMES PARTICULIERS

- Les constructions en terre à murs massifs sont lourdes. Pour une maison de plain-pied en pisé, à toiture terrasse en terre, la descente de charge est de l'ordre de 1 daN/cm². Beaucoup de sols ont des résistances similaires, voire inférieure, ou très légèrement supérieures(de 0,5 à 1,5 daN/cm²).
- Le matériau terre ne travaille bien qu'en compression et supporte mal les efforts en traction, flexion ou cisaillement. Il faut donc réduire au mieux les risques de tassement différentiel et transmettre convenablement les charges aux fondations. Il faut uniformiser les tassements et éviter p.e. le cas des fondations dissociées entre poteaux et murs.
- Le matériau terre est très sensible à la présence d'eau. Les fondations des constructions en terre doivent être mises hors d'eau :

. évacuer les eaux de surface;
. drainer les abords des fondations;
. empêcher les infiltrations;
. ne pas gêner l'évaporation.

SOLIDITE DES FONDATIONS

Les massifs de fondations doivent être solides et assurer une bonne transmission des charges au sol sans en être affectés. Pour ce faire, elles doivent être construites en matériaux résistants et insensibles à l'eau.

MATERIAUX EMPLOYES

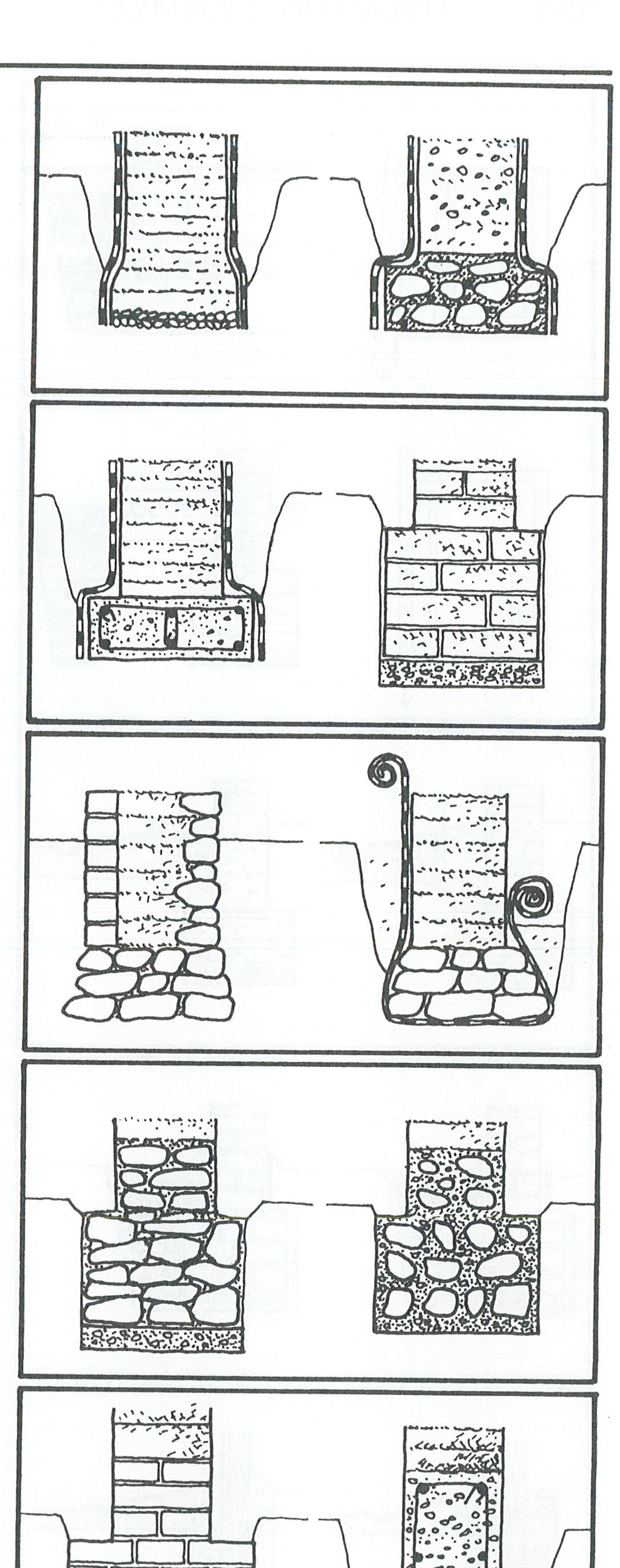
1 - EN TERRE STABILISEE

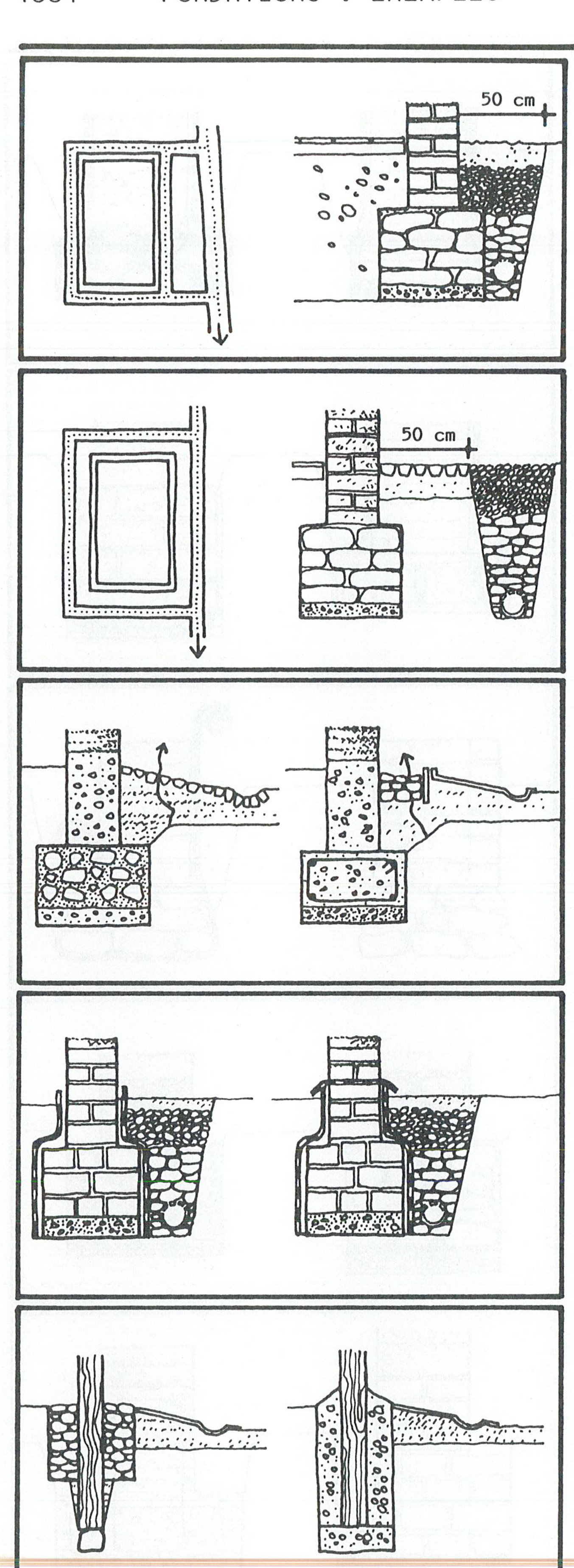
- Exceptionnellement, bien que ce soit peu recommandé, et sur des terrains secs et bien drainés. Si cette solution est la seule possible, on réalisera un pisé stabilisé en pleine fouille ou on emploiera des blocs comprimés stabilisés.
- Les fondations en terre stabilisée seront élevées sur un béton de propreté ou sur un hérisson de pierres ou couche de sable. Un massif de béton cyclopéen ou de béton armé, en fond de fouilles améliore considérablement le système.
- Dans les régions humides, les fondations en terre même stabilisées, sont exclues. S'il n'y a aucune autre possibilité, il faudra adopter une solution de protection de surface ou d'étanchéité(parements en matériaux durs, film étanche p.e.).

2 - AUTRES MATERIAUX

Tous les autres matériaux durs s'y prêtent.

- Les massifs de fondations peuvent être bâtis en pierre. On emploie alors des moellons qui sont soit bâtis en maçonnerie de blocage sur laquelle on coule un mortier, soit liés par bain de mortier et serrés les uns contre les autres. Il faut veiller à réaliser un appareil correct des moellons afin d'éviter toute possibilité de coup de sabre : décalage des joints montants liés.
- Les fondations peuvent être aussi réalisées en béton cyclopéen. Les moellons sont alors enchâssés dans des couches de béton successives qui enveloppent chaque couche de pierres, les enrobant d'au moins 3 cm. Les moellons ne se touchent pas.
- Les briques cuites conviennent aussi pour réaliser de bons massifs de fondations. Il convient d'employer des briques cuites de bonne qualité, non poreuses, et de soigner l'appareil.
- Enfin, les massifs de fondations peuvent être encore construits en béton armé selon les techniques couramment pratiquées.





MISE HORS D'EAU

La terre, même stabilisée, demeure très sensible à l'eau qui dégrade ses caractéristiques. Il convient donc, à proximité des bâtiments en terre d'évacuer au mieux les eaux de surface et souterraines afin d'éviter les remontées capillaires par les fondations.

1 - DRAINAGE

Une bonne ceinture de drainage est essentielle pour assurer une mise hors d'eau du bâtiment; elle devra être réalisée avec grand soin pour la meilleure efficacité. Le drain est réalisé dès les terrassements soit en fond de fouilles à proximité des fondations,soit écarté des fondations(1,50m). Une canalisation (en terre cuite ou autre matériau acceptable) est posée en fond de fouilles, qui collecte les eaux et les évacue par une pente régulière. La tranchée est ensuite comblée de cailloux et de graviers afin de réaliser un système filtrant.

2 - PENTE ET CANIVEAUX

A proximité du bâtiment, le sol extérieur est spécialement aménagé. Une pente (2 cm/m ou plus) permet l'évacuation des eaux de surface qui sont ensuite collectées par une rigole bien dimensionnée et écartée du mur. Il faut éviter d'imperméabiliser le sol (trottoirs étanches p.e.) afin de ne pas gêner l'évaporation de l'eau contenue dans le sol; préférer un remplissage de gravier sur une faible largeur. Les remblais de fouilles sont aussi réalisés en couches compactées et pentues vers l'extérieur.

3 - BARRIERES ETANCHES

Ecrans verticaux en parement des fondations ou écrans horizontaux faisant office de chape anticapillaire,entre les fondations et le soubassement p.e. Ces systèmes étanches sont parfaitement continus et l'on veillera à ce qu'ils ne soient ni fissurés, ni détériorés. La chape anticapillaire peut être réalisée en mortier hydrofuge(500 kg/m³) ou en produit bitumineux.

4 - COLOMBAGES

Pour les constructions en torchis ou en terre paillée en garnissage d'une structure en bois, il convient de bien traiter le bois, notamment pour les poteaux fichés dans le sol. On tâchera de noyer les bois dans un massif de fondation en pierre ou en béton. Veiller à bien drainer les abords de la construction : pente et rigoles.

FONDATIONS SUR SOLS INSTABLES

Souvent les sols des régions arides sont très instables. Notamment les terres alluviales et les terres tropicales noires, très expansives. L'instabilité de ces sols est due pour l'essentiel à l'action de l'eau qui réduit leur cohésion. Un traitement des sols de fondations et des fondations spéciales peuvent être nécessaires.

1 - SOLS EXPANSIFS

P.e. terres tropicales noires.

- Ecarter l'eau : une ceinture de drainage est essentielle ainsi qu'une pente vers l'extérieur (5 cm/m) au pied des murs pour évacuer les eaux de surface.
- Creuser les fouilles jusqu'au bon sol, compacter le fond de fouilles et les remblais en pleine masse sous les dalles et à proximité du bâtiment.
- Construire des fondations rigides : pierres, béton armé, pieux, sur des remplissages en gros gravier ou cailloux.
- Stabiliser le sol pour réduire sa sensibilité à l'eau.
- Elever des structures suffisamment flexibles : ossatures bois ou métalliques.
- Construire des murs très lourds pour contrecarrer les forces expansives.

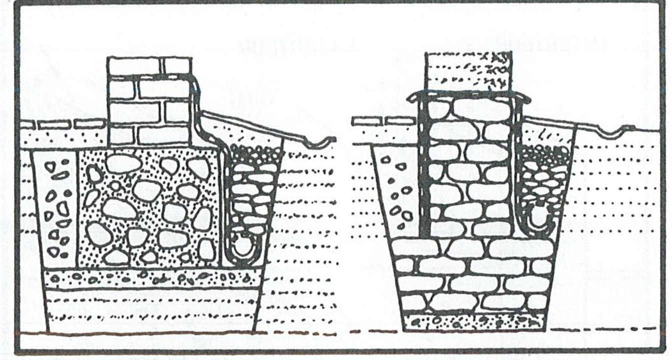
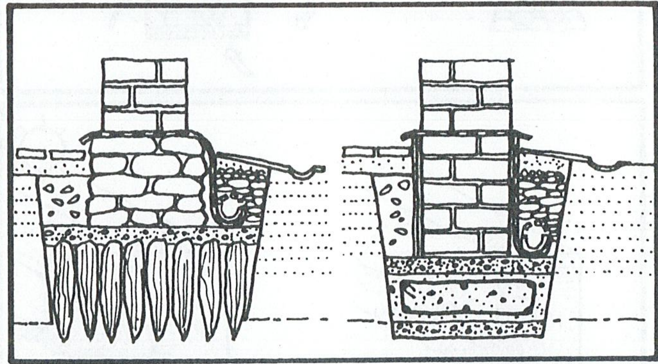
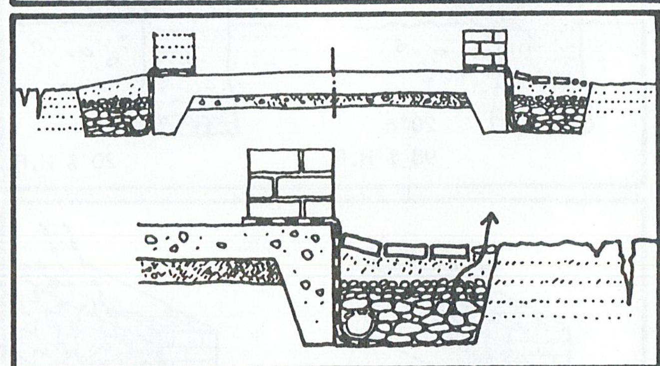
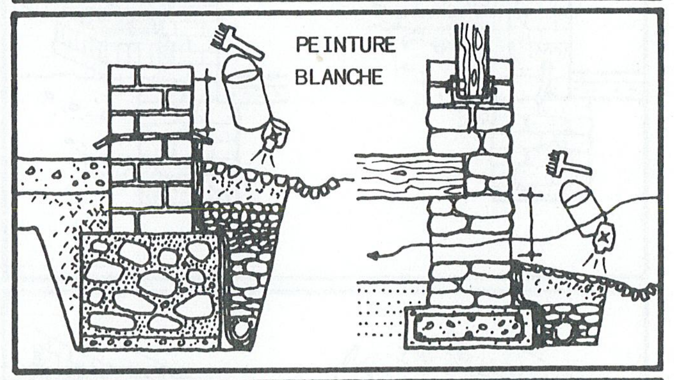
2 - SOLS PEU COHESIFS P.e. loess.

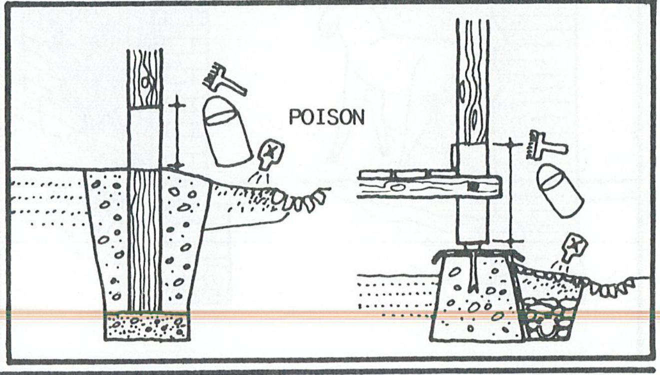
- Evacuer l'eau et drainer les abords. Ne pas gêner l'évaporation de l'eau.
- Tasser le sol et/ou stabiliser. On peut aussi préalablement inonder le sol pour qu'il se tasse par avance après le séchage.
- Elever des constructions flottantes : dalles flottantes, radiers, cuvelages. Stabiliser le sol aux abords et sous ces structures flottantes.

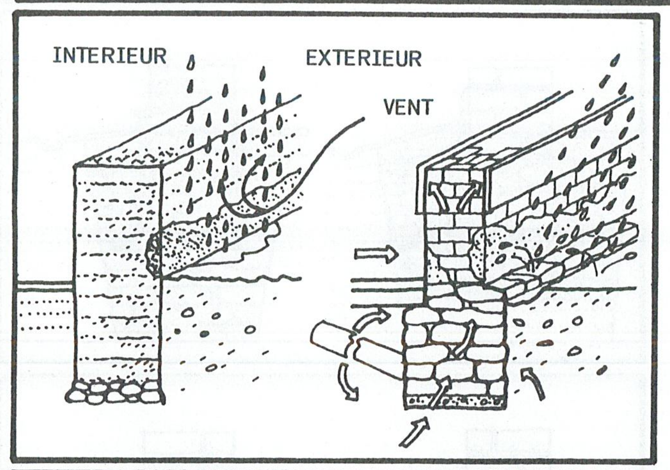
PROTECTION CONTRE LES TERMITES

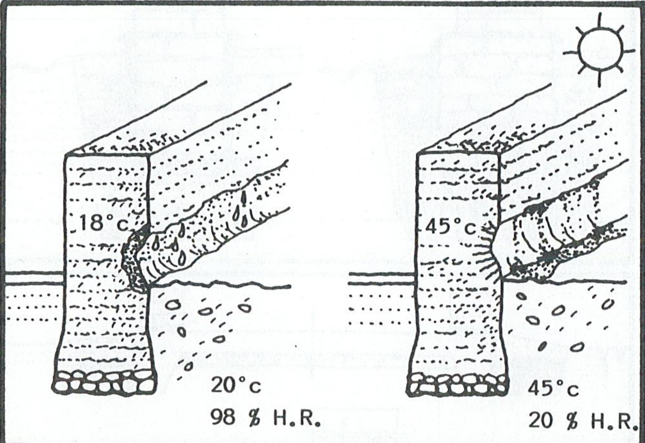
Dans les régions tropicales humides, les constructions sont souvent ravagées par les termites qui y creusent des galeries. Le bois est très exposé mais les matériaux de maçonnerie - mortier, ciment p.e. - ne sont pas épargnés. L'humidité et la chaleur favorisent l'invasion des termites. Il convient de prendre les précautions suivantes :

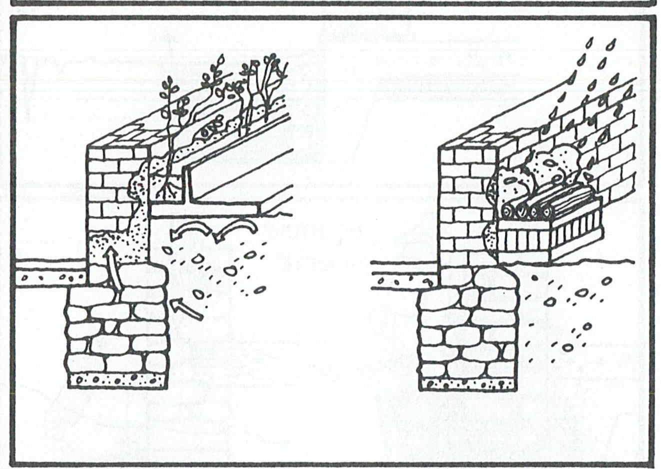
- Repousser l'humidité : drainage.
- Propreté permanente des abords de la construction.
- Isoler les bois d'oeuvre du sol : construire sur plots ou piles, dés de maçonnerie. Traiter les bois : durcir au feu, imprégner d'huiles de vidange, de carbonyl.
- Colmater les fissures en maçonnerie.
- Peindre en blanc les soubassements pour visualiser les cheminements.
- Créer une barrière chimique en traitant le sol aux insecticides anti-termites.
- Stabiliser les fondations ou soubassements en incorporant dans la terre du verre pilé.

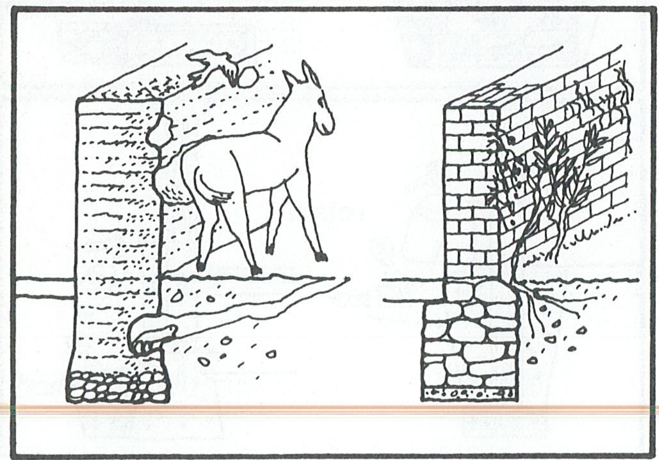















Pour les régions à climat pluvieux ou exposées aux risques d'eau (cyclones, inondations p.e.), le soubassement est un ouvrage indispensable qui assure la mise hors d'eau des constructions.

CONTRAINTES

1 - ATTAQUE DE L'EAU

La base des murs en terre est très exposée aux risques d'érosion par l'eau : eau de rejaillissement, eau stagnante, eau capillaire. De même, la condensation (rosée matinale, même en climat désertique) et les cycles répétés de mouillage/séchage peuvent fortement éroder la base des murs. L'action de l'eau peut entraîner :

- Un changement d'état du matériau qui perd sa cohésion et sa résistance en passant de l'état sec à l'état humide.
- Des dépôts de sels qui altèrent la structure minérale de la terre : rupture de la matrice cohésive de l'argile.
- Un éclatement dû au gel en saison froide.
- Une colonisation de flore parasite (mousse, lichen) qui retient l'humidité et favorise la nidation d'insectes et de rongeurs.

2 - REHAUSSEMENT DU TERRAIN NATUREL

Le niveau du terrain naturel,à proximité des constructions, peut être élevé à cause de l'activité agricole, de travaux de voirie (rehaussement des chaussées en zone urbaine), par la création de trottoirs étanches, par la construction de jardinières plantées le long du soubassement, par un dépôt d'objets le long du mur. Cette élévation du terrain naturel risque d'exposer plus directement le mur de terre qui se voit peu à peu dépourvu de soubassement protecteur.

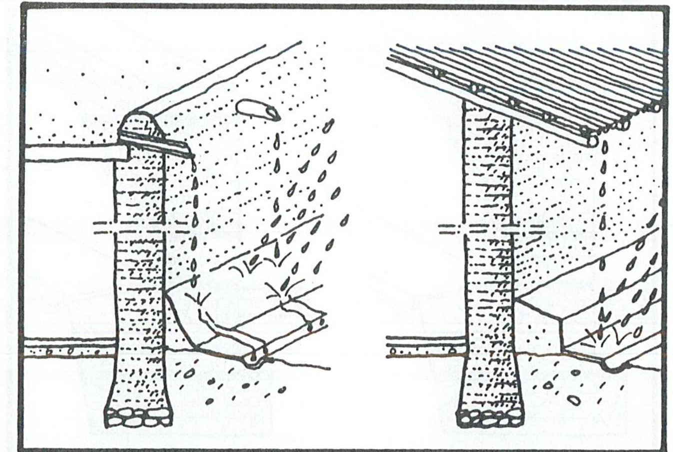
3 - EROSION ACCIDENTELLE OU VOLONTAIRE

- L'activité humaine p.e. : chocs de voitures, de charettes, d'objets divers.
- L'activité animale : frottement du bétail contre la base du mur, creusement de galeries de rongeurs ou de termites, nidation d'oiseaux.
- Développement d'une végétation de surface due à l'humidité ou volontairement plantée qui entretient une pathologie humide et un dépôt de sels, d'efflorescences.

PRINCIPES DE PROTECTION

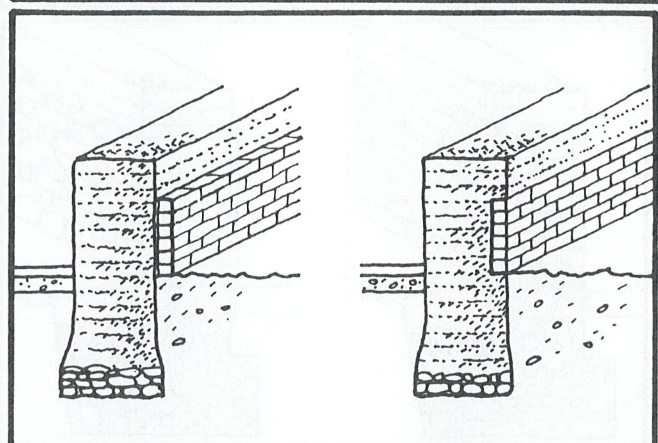
1 - MASSE D'USURE

Ce principe de base convient notamment pour les soubassements en terre très exposés à l'érosion de l'eau - rejaillissement, condensation p.e. Contre la base du mur est rapportée une masse de terre qui sera altérée avant le soubassement en terre. L'entretien régulier de cette masse d'usure protectrice est indispensable.
Cette masse d'usure est de préférence doublée d'un système d'évacuation des eaux de ruissellement collectées à la base : rigole, caniveau.
Le procédé convient tout autant aux bâtiments à toitures débordantes qu'aux toitures plates à acrotères.
La masse de terre doit être assez volumineuse : évaporation des eaux capillaires p.e.
L'architecture traditionnelle a largement exploité le principe de protection : architecture en terre du Mali, du Maroc, d'Arabie Saoudite p.e.
Ce principe de protection présente l'avantage d'être facile à construire et économique.



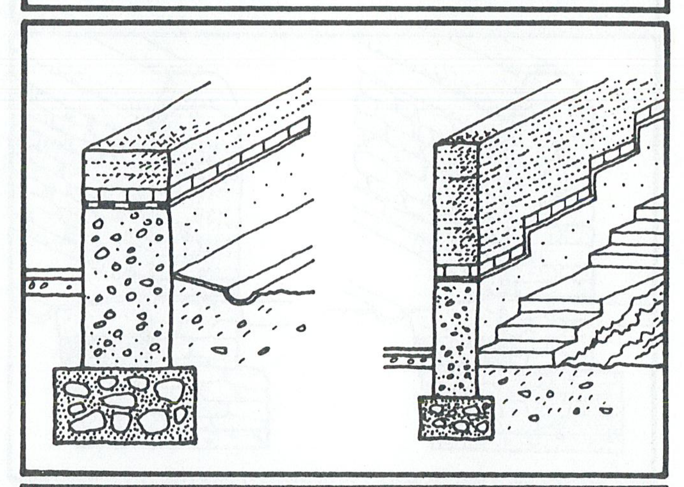
2 - MATERIAU RAPPORTE A LA BASE

Ce peuvent être des pierres, des briques, du bois, des nattes, des tuiles, etc ...
Ces matériaux de protection sont soit rapportés contre la base du mur, soit incorporés à la base du mur.
L'épaisseur et la hauteur de ce système de protection rapporté doivent être suffisantes pour permettre une bonne évaporation des eaux capillaires.



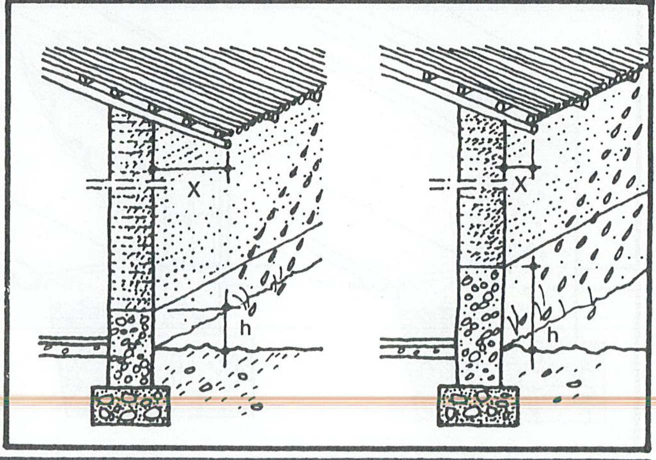
3 - SOUBASSEMENT

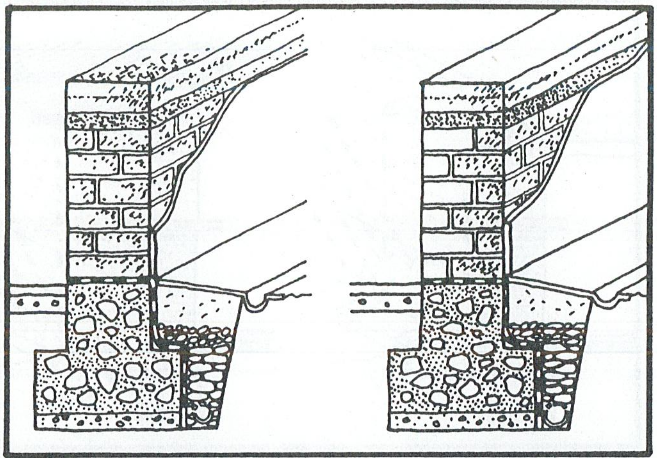
Tous les matériaux solides connus peuvent être employés : pierre, brique, béton.
Le soubassement en maçonnerie est suffisamment élevé, en fonction des contraintes d'usure locales (eau, vent) et suit les accidents du terrain et les aménagements des abords : terrasses, escaliers p.e. Il faut veiller à assurer une étanchéité entre ce soubassement et le mur de terre.

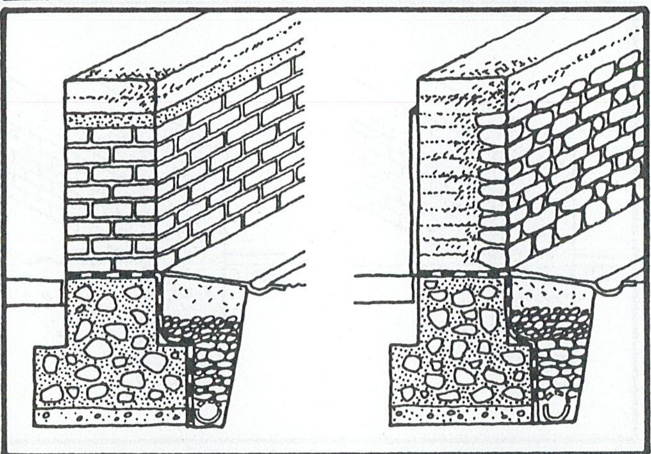


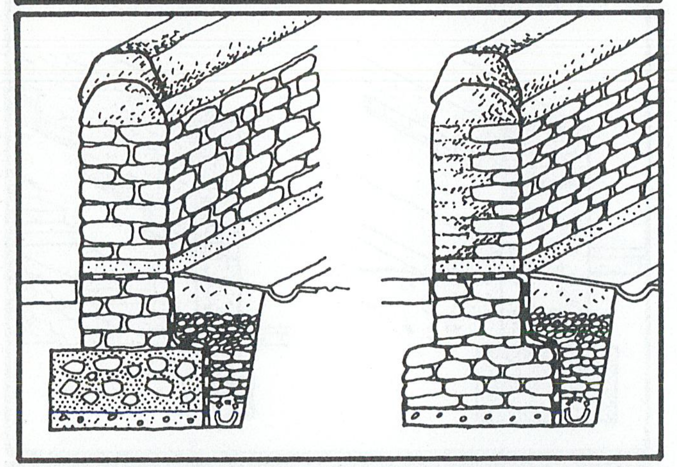
4 - HAUTEUR DU SOUBASSEMENT

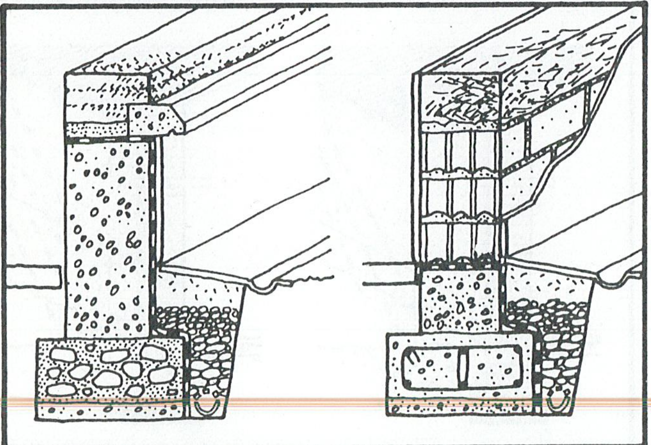
Elle est fonction du régime pluviométrique local, du risque d'inondation, du débord de toiture, de l'évaporation de l'eau accumulée dans la base du mur.
- Région sèche : 0,25 m.
- Pluviométrie moyenne : 0,40 m.
- Forte pluviométrie, toit peu débordant : 0,60 m ou plus.
- Zone inondable (berges de cours d'eau p.e.) : 0,80 m à 1,00 m. Permettre une bonne évaporation de l'eau capillaire absorbée par la base.











1 - BRIQUES CRUES STABILISEES

Ce matériau peut être employé mais très exceptionnellement et lorsque l'on est assuré de construire sur un terrain sec, bien drainé et abrité des infiltrations d'eau. Les briques crues stabilisées demeurent hydrophiles ainsi que le mortier d'appareillage.

Il est possible soit de construire tout le soubassement en briques crues, stabilisées, en respectant les règles de bonne construction (appareil notamment) ou seulement le parement du soubassement. Dans ce dernier cas, on évitera une trop grande différence de résistance entre les briques stabilisées et non stabilisées.

Il est préférable de revêtir ce type de soubassement d'un enduit qui demeure perméable à la vapeur d'eau. Il faut arrêter cet enduit avant le sol pour éviter toute succion capillaire.

Les abords doivent être bien aménagés : pente vers l'extérieur, ceinture de drainage, rigole d'évacuation des eaux de surface.

2 - BRIQUES CUITES

Les briques cuites employées ne doivent pas être poreuses. Si c'est le cas, on adoptera les mêmes dispositions que pour la brique crue stabilisée. On peut aussi n'employer les briques cuites qu'en parement ou composer un revêtement protecteur de briques et de pierres p.e. Ce procédé de parement est notamment intéressant pour les reprises en sous-oeuvre en cas de restauration.

3 - PIERRES

Selon sa perméabilité, la pierre est plus ou moins considérée comme un matériau hydrofuge. Les pierres de bonne qualité peuvent rester apparentes mais l'on veillera à réaliser des joints en creux, repris au fer afin d'éviter les infiltrations d'eau. Cette disposition facilitera l'accrochage d'un enduit éventuel.

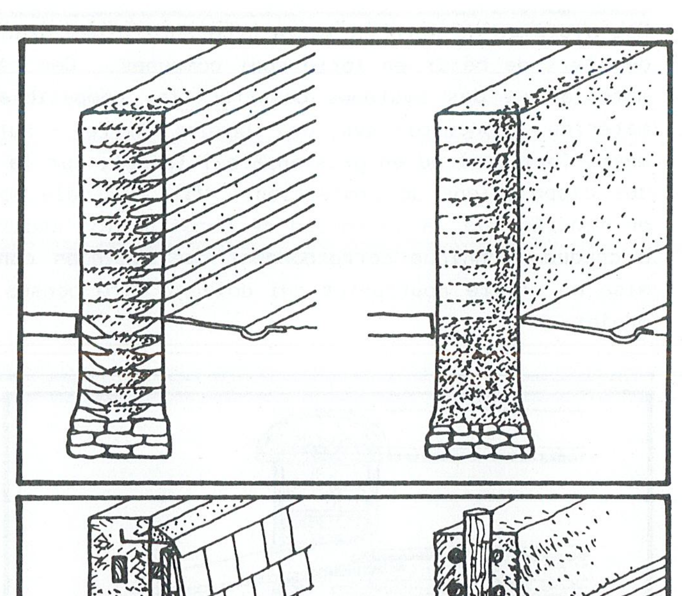
4 - BETON OU ELEMENTS DE BETON

Le béton, correctement dosé (250 kg/m³) peut être considéré comme hydrofuge mais l'on conseillera de le protéger par un écran étanche; surtout pour les parties enterrées et dans le cas ou le béton est un peu maigre.

Les agglomérés de béton, pleins ou creux, peuvent être employés en soubassement mais plutôt pour les murs de terre légers : terre-paille p.e. Un écran étanche est indispensable.

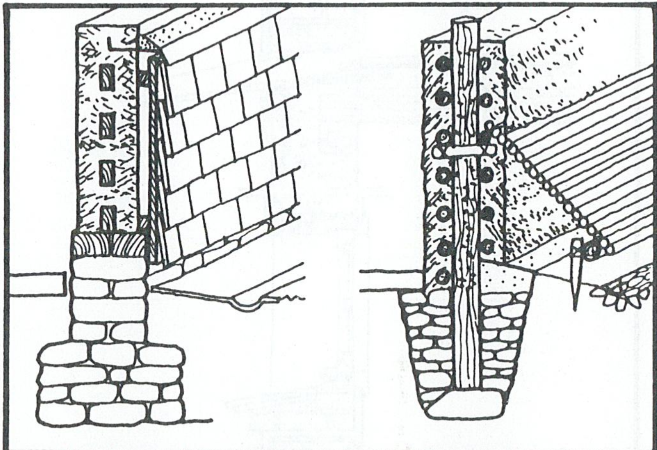
5 - PISE STABILISE

Le pisé peut être stabilisé dans toute l'épaisseur du soubassement ou uniquement en parement. Le deuxième procédé a l'avantage d'être plus économique mais exige une mise en oeuvre très soignée. Le pisé non stabilisé et le pisé stabilisé sont damés en même temps, couches après couches, la fraction de terre stabilisée étant damée contre la banche en parement extérieur du mur.
On peut aussi réaliser une protection de surface en disposant des filets de mortier de chaux contre la banche, toutes les couches de terre compactée. Le mortier est jeté à la truelle et son épaisseur est réglée avec un traçage contre la banche pour assurer une bonne finition du mur.



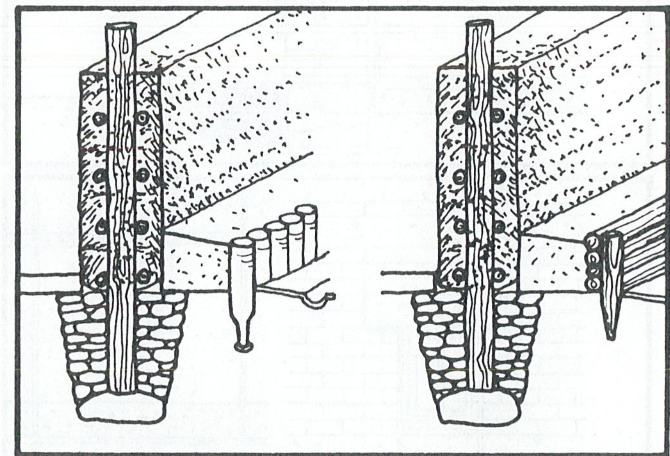
6 - BARDAGES

Des bardages en bois (dosses ou essentes, voliges clouées à recouvrement) peuvent être rapportés contre le soubassement. Ce type d'ouvrage exige souvent un lattis en bois pour fixer le bardage. Ce système est plus efficace avec lame d'air permettant une ventilation et une évaporation de l'humidité éventuellement retenue derrière le bardage.
Des bardages économiques peuvent être réalisés en tressage de roseaux ou en nattes de paille mais devront être entretenus et périodiquement remplacés. Les bardages offrent aussi l'avantage d'une protection thermique, notamment lorsqu'ils sont ventilés.



7 - SOCLE, TROTTOIR

Ce peut être un simple bois posé en long, devant le soubassement et à l'aplomb de l'égout de toiture, pour briser le rejaillissement. Des bouteilles, des boîtes de conserve ou des pierres fichées dans le sol conviennent également.
Des rondins empilés, calés par des potelets et retenant un trottoir de terre constituent un système plus élaboré. Le trottoir doit avoir une légère pente et on doit prévoir une rigole de drainage.

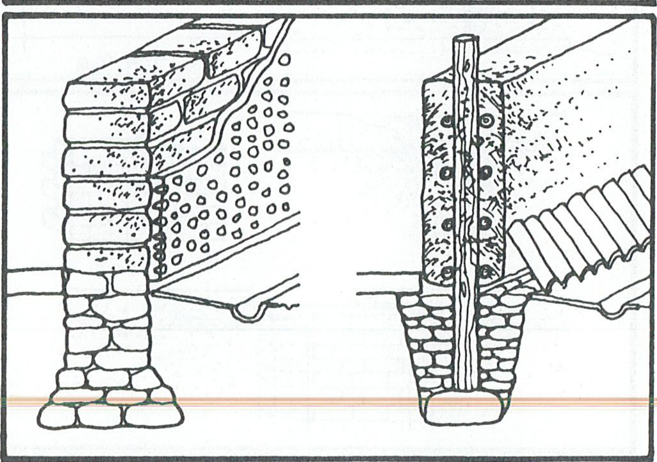


8 - ENDUITS INCRUSTES

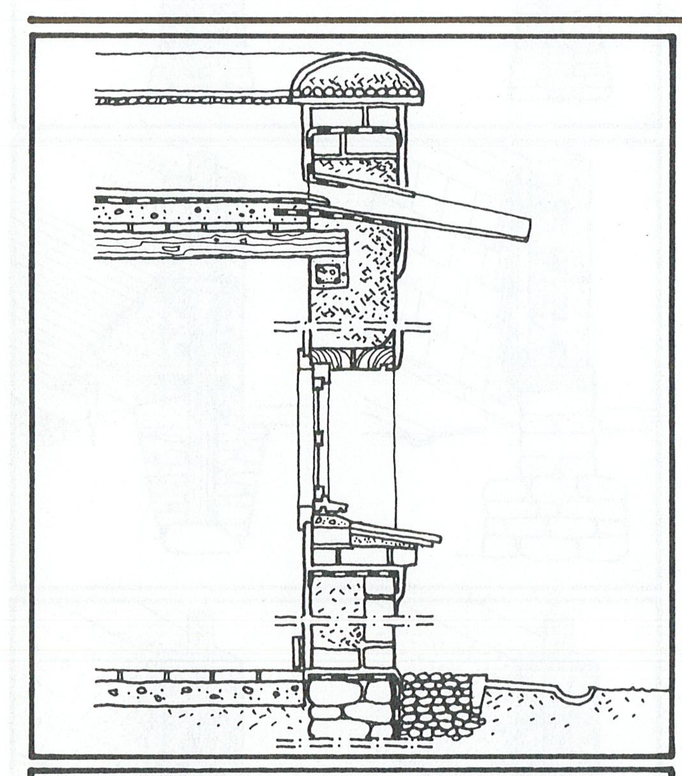
L'enduit qui revêt le soubassement est incrusté de pierrailles ou d'éclats de pierre, constituant une bonne couche d'usure de surface.

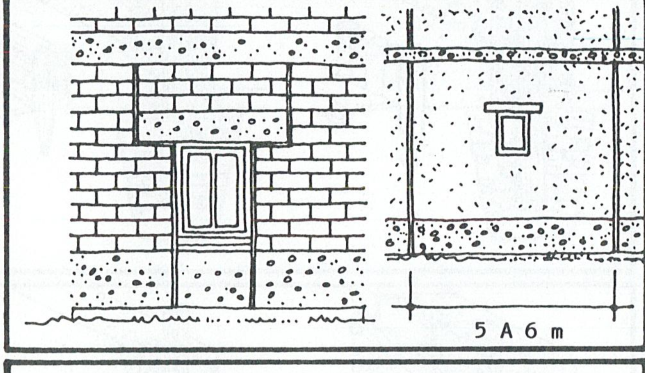
9 - PROTECTION TEMPORAIRE

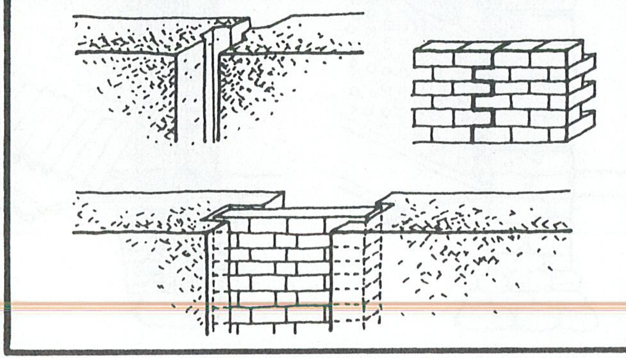
Pendant la saison des pluies, de simples tuiles ou pierres plates posées contre la base du mur peuvent assurer une protection satisfaisante et très économique.



Les systèmes de murs en terre crue sont d'une grande diversité mais, au-delà des variantes, les règles de l'art de bâtir en terre sont communes. Ces règles insistent sur les sollicitations mécaniques du matériau et des systèmes constructifs, compatibles avec les performances et les caractéristiques du matériau - concevoir avec une logique "terre" - sur l'importance du calepinage de la maçonnerie en éléments (briques) ou en gros appareil (pisé), sur la sensibilité à l'eau du matériau qui oblige à prévoir des dispositions de protection. Mais, au-delà de ces règles fondamentales, il convient de raisonner en fonction de la technique de construction choisie et des contraintes de situation du projet. Car à chaque technique correspondent des systèmes constructifs, des détails d'exécution et des modes de mise en oeuvre appropriés qui doivent être pensés finement dès le stade de la conception sommaire du projet.







COMPORTEMENT MECANIQUE

La terre travaille bien en compression mais résiste mal aux efforts de traction, de flexion et de cisaillement. Il faut donc éviter :

- Les charges excentrées;
- Les flexions et risques de flambement;
- Les charges concentrées.

Il faut aussi prêter attention :

- Au dimensionnement et à la stabilité des murs maîtres et de refend, des piliers et contreforts, appui d'arcs et de voûtes;
- Aux appareils des maçonneries à éléments;
- Aux encastrements et scellements.

DIMENSIONNEMENT

L'expérience des bâtisseurs a établi un rapport d'épaisseur minimale des murs égal au 1/10 de la hauteur du bâtiment, pour les murs en briques de terre. On admet aussi une épaisseur minimale de 30 cm pour des murs en pisé d'une maison de plain-pied et de 45 cm avec un étage. De même, on ne doit pas dépasser une distance maximale de 5 à 6 m entre murs de refends ou renforts ou entre joints de dilatation(joints secs prévus par avance et intégrés aux ouvertures ou résolument séparés des ouvertures). La dimension des murs est aussi fonction de chaque technique de construction et des contraintes propres du projet: charges propres et d'occupation, contraintes thermiques p.e.

- **CALEPINAGE** : Les murs en terre en maçonnerie d'éléments (adobes, blocs comprimés) répondent aux règles d'appareillage appliquées pour la brique ou la pierre.
- **SENSIBILITE A L'EAU** : Il faudra protéger les murs et notamment leur base en veillant aux remontées capillaires, à la condensation de vapeur en murs froids et pièces humides, à la pluie, au gel, à la neige.
- **SENSIBILITE AUX CHOCS** : Les murs de terre ou parties de murs exposés à une érosion d'usage - bas de murs, angles, têtes de murs, acrotères, tableaux de baies p.e. - devront être protégés par un enduit ou maçonnerie en "dur".
- **STABILITE AU FEU** : Il y a une induration superficielle avec un risque de combustion étouffée des systèmes en bois intégrés (chaînage, p.e.).

La qualité du mortier et le soin apporté à la pose améliorent considérablement la résistance des murs. L'emploi d'un mortier de terre stabilisé au ciment augmente de 25 % la résistance à la compression d'un mur d'adobes et double sa résistance au cisaillement. La stabilisation peut doubler la friction et quadrupler l'adhérence du mortier à la brique. L'absence de bourrage des joints verticaux diminue la résistance à la compression d'un mur de 20 à 50 % et supprime toute résistance à la flexion et au cisaillement. L'emploi d'un mortier trop liquide doit être proscrit car le retrait et le manque d'adhérence sont trop importants et diminuent la stabilité et la résistance des murs. Ces considérations sont particulièrement importantes pour les zones à risque sismique.

PERFORMANCES

Le mortier de pose doit avoir la même résistance à la compression et à l'érosion que les briques. Si la résistance du mortier est inférieure, il y a érosion, infiltration d'eau et détérioration des briques; fissuration du mortier, travail en traction des briques, risque de rupture.

Si la résistance du mortier est supérieure, il y a érosion des briques, stagnation de l'eau sur la matrice apparente du mortier qui active l'érosion des briques; fissuration des briques.

La qualité du mortier doit se contrôler par des essais préalables : retrait, adhérence, érosion, compression.

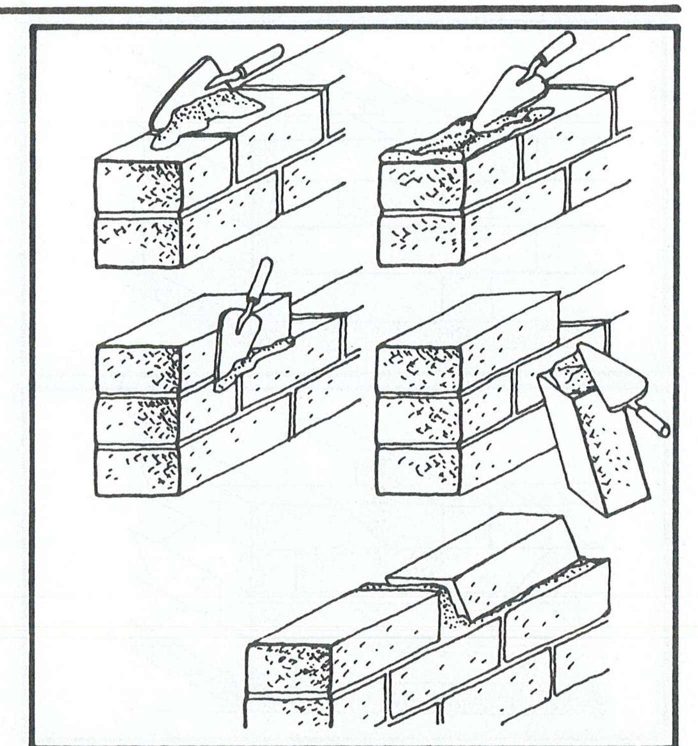
Pour des briques stabilisées, il faut employer un mortier stabilisé. La texture et l'état hydrique du mortier sont différents de ceux de la brique : le dosage en ciment ou en chaux du mortier doit être augmenté de 1,5 à 2 fois pour obtenir la même résistance que la brique.

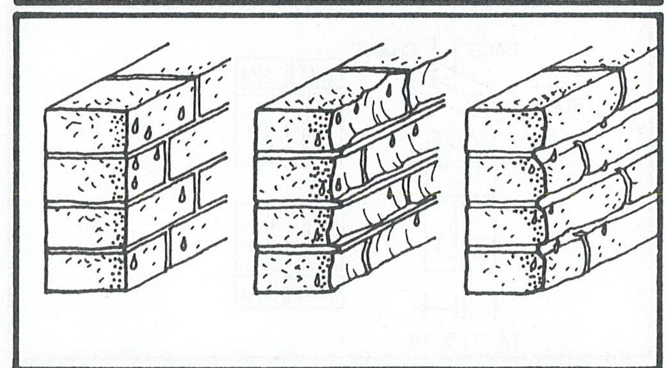
Le retrait des joints provoque un retrait horizontal du mur de 1 à 2 mm/5 m.

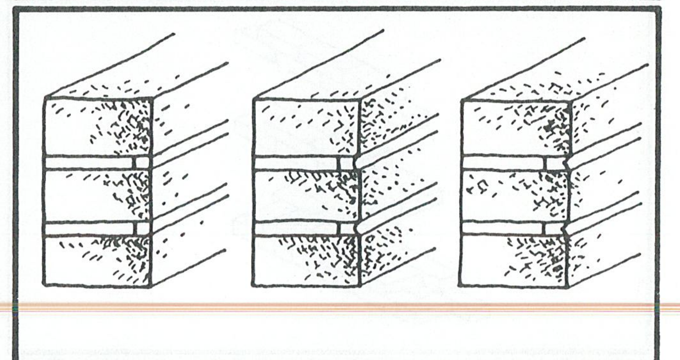
Le tassement des joints sous la charge provoque un retrait vertical du mur : 1 à 2 cm/3 m.

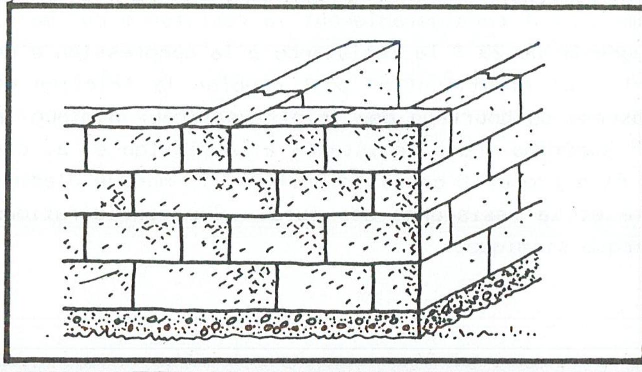
BONNE PRATIQUE

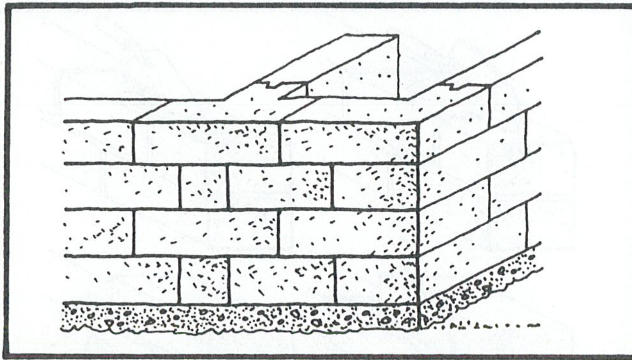
- **TEXTURE DU MORTIER** : Plus sableuse que celle de la brique avec un diamètre maximal de 2 à 3 mm.
- **EPAISSEUR DES JOINTS** : Horizontaux ou verticaux, les joints sont épais d'un maximum de 1 à 1,5 cm; tolérance de 2 cm max. pour l'adobe.
- **QUANTITE DE MORTIER** : En rapport de volume de mortier/volume de mur : 1/4 à 1/7. Pour des blocs de 29,5x14x9, et pour 1 m³ de mur construit : mur de 14 cm : 220 litres de mortier (blocs pleins), 250 l (blocs évidés); mur de 30 cm : 275 l (blocs pleins) et 320 l (blocs évidés).
- **MISE EN OEUVRE** : Il faut prétremper les briques stabilisées et mouiller le plan de pose. La brique doit être tartinée de mortier sur les faces à jointoyer en utilisant des quantités justes. On ne tape pas sur la brique mais on la plaque. Une protection du soleil et du vent s'impose.
- **REPRISE DES JOINTS** : Immédiatement après la pose, gratter sur 2 à 3 cm de profondeur, reboucher au mortier stabilisé et passer un fer à joint.

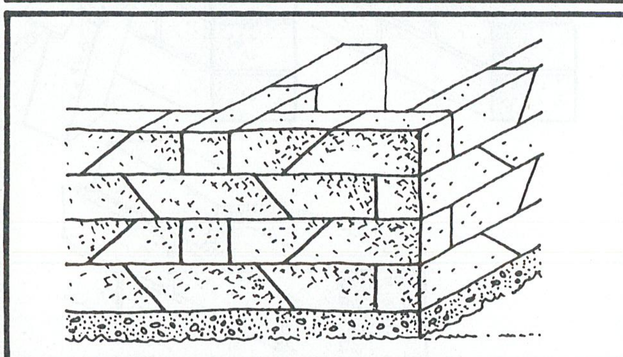


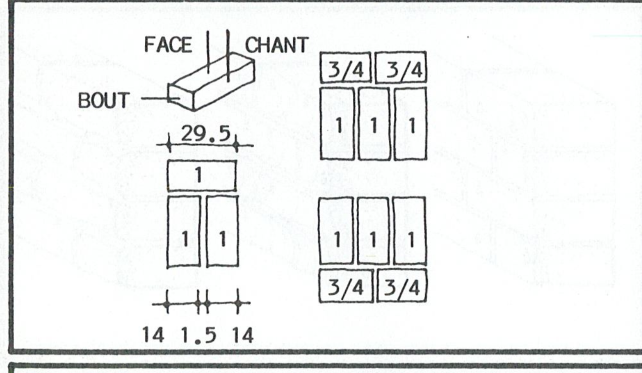


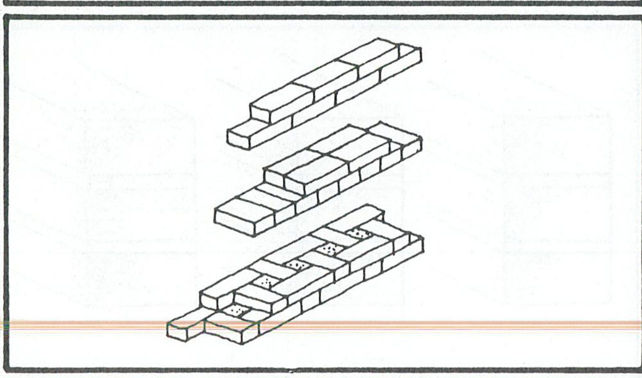












CALEPINAGE : BRIQUES ET PISE

Les murs en adobe ou en blocs comprimés exigent une bonne définition du calepinage (position des joints). Les malfaçons d'appareil risquent de provoquer une pathologie structurale : coup de sabre p.e. Les règles d'appareillage applicables à la maçonnerie en briques crues sont celles qui servent pour la brique cuite. La littérature technique abonde en exemples de référence.

Pour le pisé réalisé en banchées modulées, on considère qu'il s'agit d'une maçonnerie en grand appareil exigeant un décalage des joints verticaux (minimum de 1/4 de banchée) et un parfait harpage des angles et des liaisons de murs. Il convient donc d'employer des banches aux dimensions adaptées au calepinage prévu dès la conception du projet, en fonction des cotes hors oeuvre de la conception. Les joints entre banchées peuvent être droits (Maroc, Pérou p.e.) ou inclinés (France p.e.)et si possible à engravure pour une meilleure liaison.

BRIQUES: TERMINOLOGIE, MODULATION

Les briques ou blocs de terre sont composées de 6 parements : 2 faces, 2 bouts et 2 chants. Les appareils sont nommés selon le plan de pose des briques qui fait apparaître en façade du mur un de leur parement :

EN BOUTISSE : a plus grande dimension de la brique est dans l'épaisseur du mur, un de ses bouts apparaît en façade.

EN PANNERESSE : la plus grande dimension de la brique et un chant sont visibles.

EN CARREAU : la plus grande dimension et une face sont visibles : à éviter car la brique est posée selon le plan de clivage.

EN PARPAING : la brique est visible sur les 2 façades du mur et présente ses 2 bouts.

MODULATION : l'appareil des murs est réalisé avec des briques entières mais l'on rencontre aussi des 3/4 et des 1/2. Les appareils de piliers emploient souvent le 3/4.

APPAREILLAGE

En façade, l'écart entre 2 joints verticaux, d'une assise à une autre, ne doit pas être inférieur au 1/4 d'une panneresse. Des joints superposés constituent un "coup de sable", malfaçon qu'il faut éviter. Règle de recouvrement des joints : Dans l'épaisseur du mur, les joints montant liés et mesurés dans une direction peuvent se recouvrir au plus d'une longueur de 3/4 de brique. La somme en longueur d'un recouvrement de joints croisés et liés verticalement peut au plus atteindre la longueur d'une brique.

APPAREILS CLASSIQUES

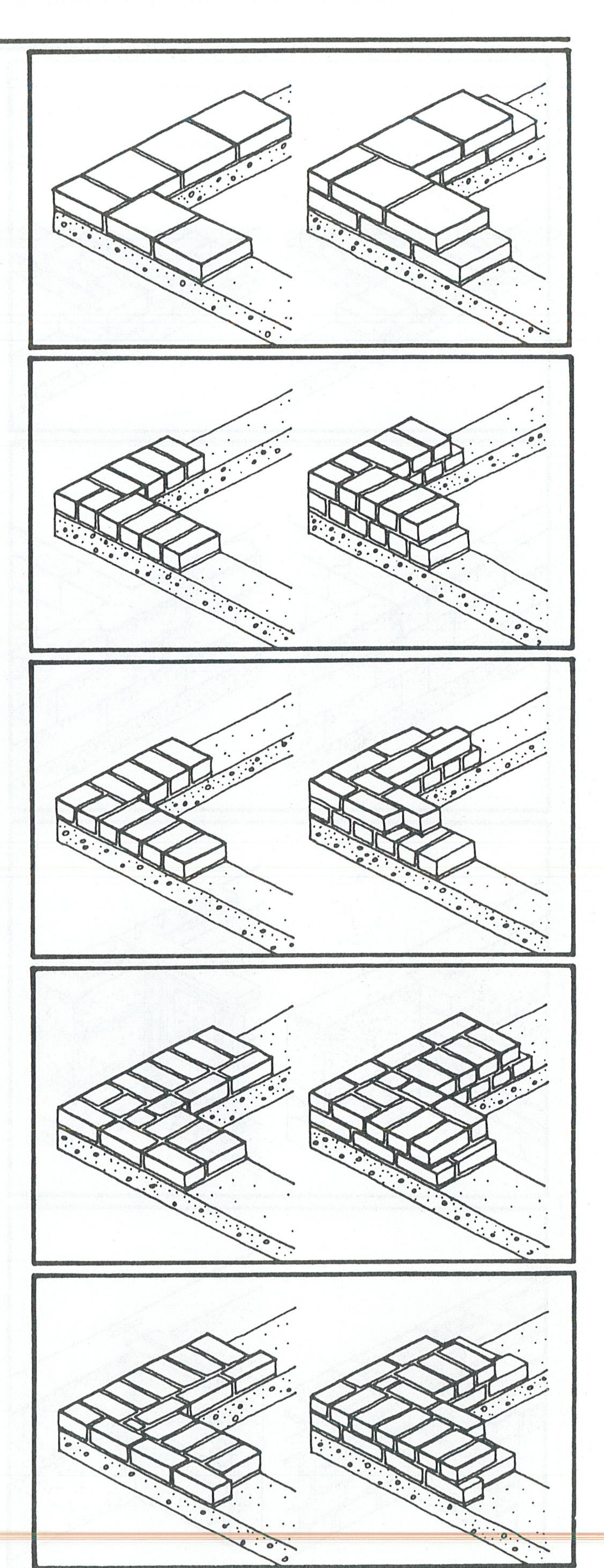
1 - BRIQUES CARREES

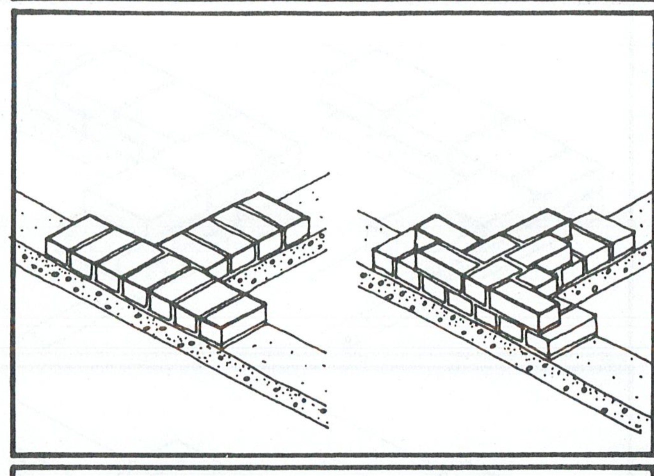
Le module carré est souvent employé dans la construction en adobe, en Amérique latine : 40x40x9 cm p.e. Ce type d'adobe est le plus souvent bâti en parpaing. Les angles exigent l'emploi d'une ½ brique pour un bon harpage; une brique plus grande, rectangulaire permettrait de moins affaiblir l'angle. De même pour les liaisons de murs extérieurs et de refend.

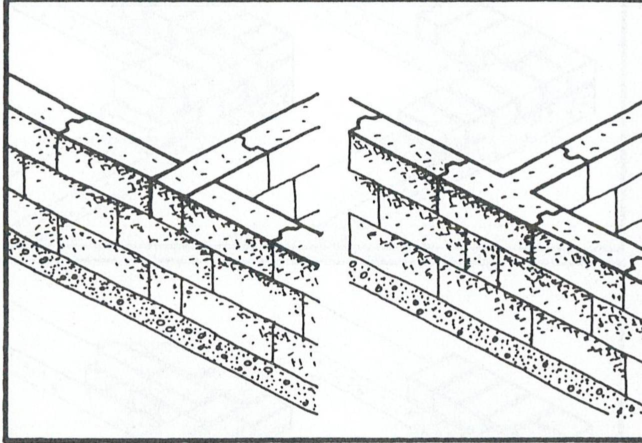
2 - BRIQUES RECTANGULAIRES

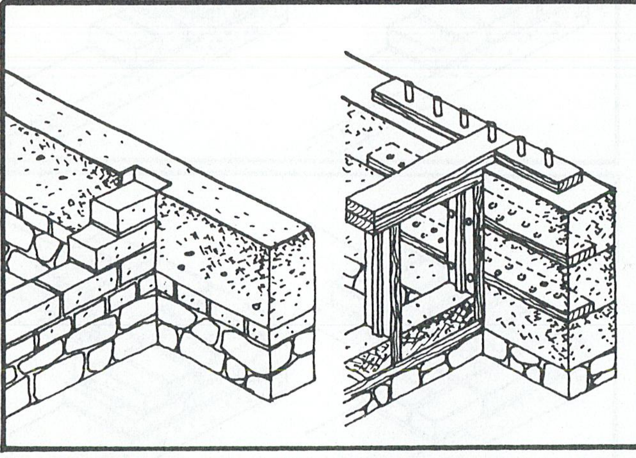
Le module rectangulaire le plus courant, produit par la grande majorité des presses du marché, présente des dimensions nominales de 29,5x14x9 cm. Les variations d'épaisseur du bloc ne modifient pas les appareils selon le plan de pose choisi. Ce type de briques permet de construire des murs minces de 14 cm d'épaisseur, en panneresse, des murs de 29,5 cm appareillés en parpaing ou en panneresse et parpaing. La construction de l'angle droit fait intervenir l'emploi d'un module 3/4. Ces briques permettent aussi de bâtir des murs de 45 cm d'épaisseur qui conviennent pour une plus grande inertie thermique ou pour une bonne reprise des poussées d'arcs, de voûtes ou de dômes. Les appareils en 45 cm d'épaisseur sont aussi variés que les appareils pour murs moins épais. On en connaît en boutisse et panneresse qui emploient le 3/4 et le 1/2 pour les angles ou même, toujours en boutisses et panneresses qui emploient le 3/4 et le 1/4 pour les angles.

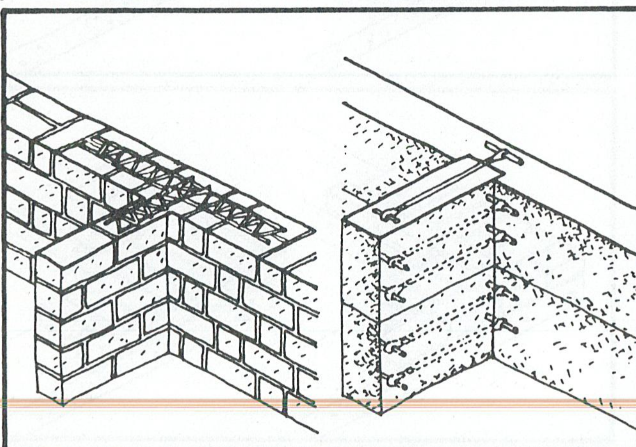
Les murs plus épais - 60 cm p.e. - exigent l'emploi de 3/4,1/2 et 1/4 pour les angles et liaisons de murs. Les grosses épaisseurs sont plus complexes à mettre en oeuvre et peu économiques du fait de la grande quantité de matériaux employés et du fait d'un abaissement des rendements de pose. Pour les murs plus épais, on pourra préférer d'autres modes de mise en oeuvre de la terre crue, le pisé ou la bauge p.e.











LIAISONS DE MURS

Il convient d'assurer une bonne liaison structurale des murs entre eux - murs extérieurs et murs de refend p.e. - afin d'obtenir une bonne résistance de la structure et donc une bonne stabilité de l'ouvrage.
Les solutions connues de liaisons de murs varient selon que les 2 murs qui doivent être liés sont construits en matériau identique ou en matériaux différents.

1 - MATERIAUX IDENTIQUES

Pour la maçonnerie d'éléments, il faut prévoir un parfait calepinage de la liaison de murs qui assure un bon harpage des éléments maçonnés. Cette liaison est conçue selon les règles d'appareillage et de recouvrement de joints qui visent à éviter toute possibilité de coup de sabre entre les joints montants liés. Selon les épaisseurs de murs liés, l'appareil de la liaison sera plus ou moins complexe et il n'est pas rare d'employer les modules 3/4 et 1/2. Dans le cas d'une liaison d'un mur épais et d'un mur mince, on peut aussi prévoir une saignée verticale dans le mur épais dans laquelle viendra s'emboîter le mur mince. Mais il faudra aussi prévoir des renforts horizontaux (fers,bois,grillage) qui améliorent la liaison en T des 2 murs, disposés tous les 5 à 6 rangs de briques p.e. Un chaînage viendra aussi relier les murs au niveau des planchers, en continuité.
Pour le pisé, on peut coffrer la liaison de murs d'une seule pièce, à l'aide de coffrages spéciaux en T, soit assurer un harpage des banchées dans 2 directions : 1 banchée sur 2 du mur de refend recouvre le mur extérieur. On peut aussi prévoir une saignée dans le mur extérieur mais il faudra alors renforcer la liaison de murs,horizontalement et dans toutes les directions toutes les banchées.

2 - MATERIAUX DIFFERENTS

Il faut dans ce cas éviter les liaisons de murs harpées car le travail différentiel et les résistances différentes des matériaux risquent de provoquer des fissures. le meilleur procédé est alors celui de la saignée dans le mur extérieur.
Pour lier des cloisons légères à ossature bois à un mur de pisé, on peut prévoir de noyer des planches en bois dans le pisé, sur lesquelles la cloison sera vissée. Le dernier poteau du galandage en bois peut aussi pénétrer dans le mur.

ANGLES

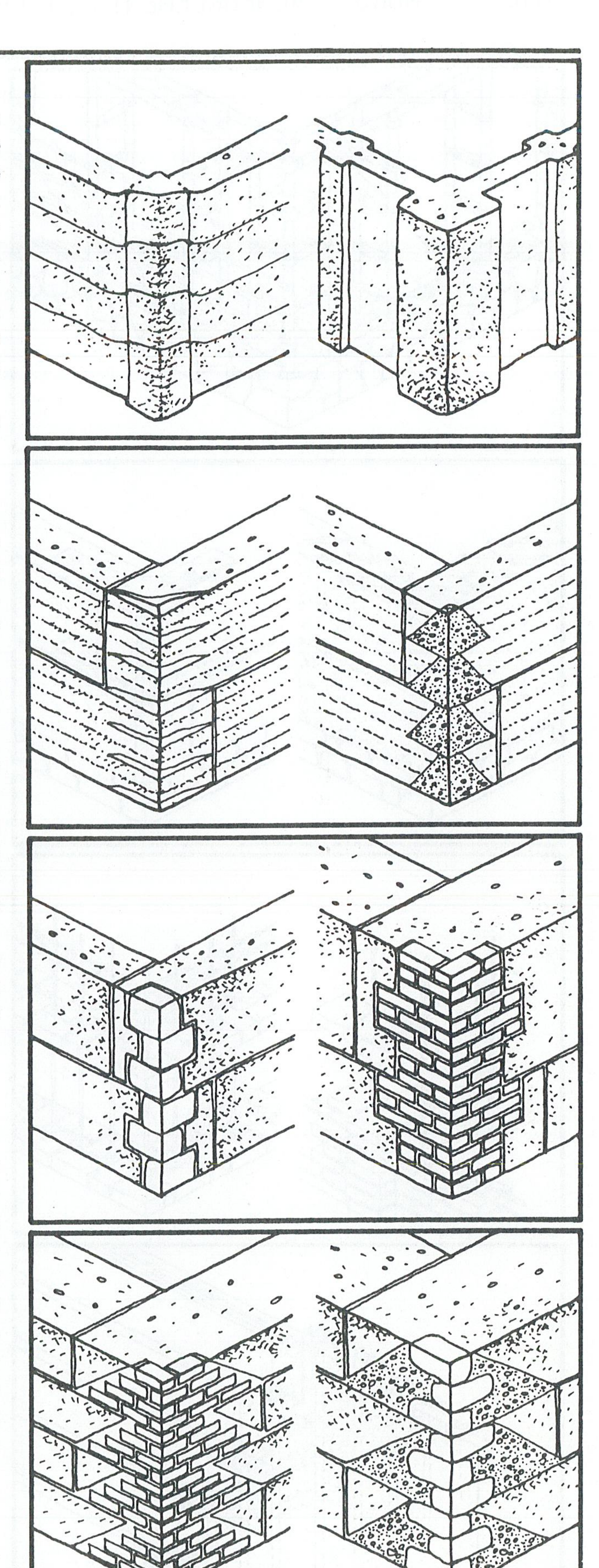
C'est aux angles des constructions que se font les liaisons structurales des murs. La stabilité des angles assure en grande partie la stabilité des constructions. Sur les maisons en terre, c'est très souvent aux angles que l'on peut observer des fissures structurales qui mettent en péril la construction. Ces fissures peuvent résulter d'un tassement différentiel entre le sol et la construction - dans le cas de mauvaises fondations p.e. - et ce sont alors les angles qui souffrent le plus ainsi que les autres liaisons de murs. Mais ces fissures peuvent aussi prévenir d'une mauvaise liaison des murs.

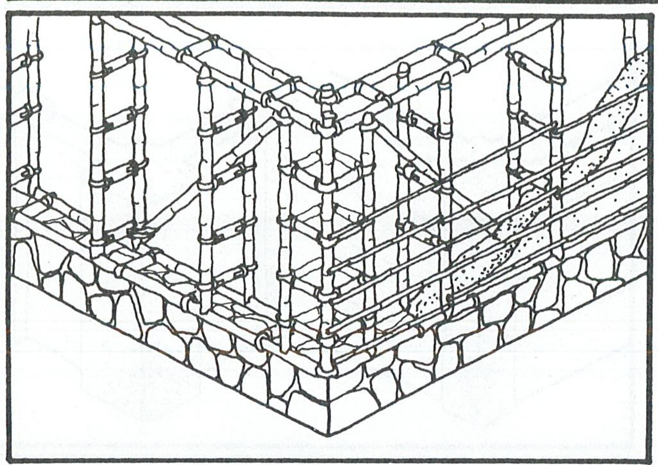
1 - ANGLES EN TERRE

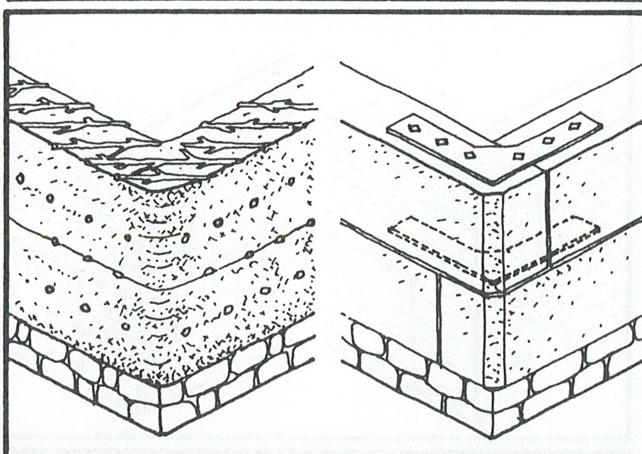
Pour la maçonnerie en adobes ou en blocs comprimés la construction des angles exige l'application rigoureuse des règles de calepinage et d'appareillage. Il faut aussi éviter de trop fractionner les briques afin de ne pas affaiblir l'angle. Le module 3/4 doit être si possible, le plus petit module à employer. Le module 1/2 est encore acceptable mais le 1/4 doit être évité.
Pour le pisé, il convient de harper l'angle dans les 2 directions de murs à lier, alternativement, une banchée sur 2. On peut aussi coffrer l'angle d'une seule pièce avec un coffrage spécial en L et l'on veillera alors à un décalage suffisant des joints verticaux, de banchée à banchée. Ne pas oublier de chanfreiner les angles.
Pour la bauge, on connaît de nombreux exemples d'épaississement des angles qui sont tout à fait convenables et qui constituent aussi une forme d'usure.

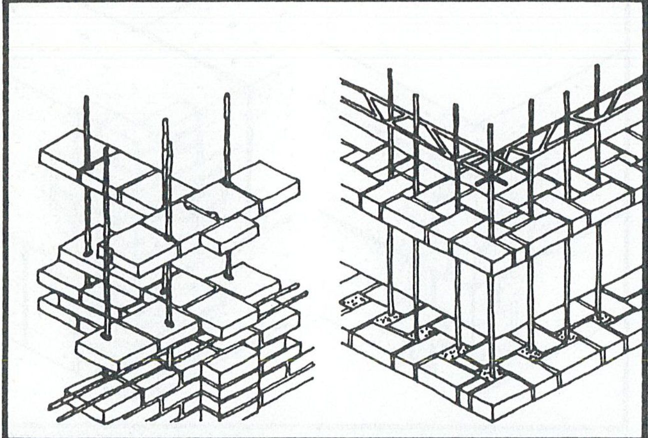
2 - ANGLES MACONNES EN MATERIAUX DURS

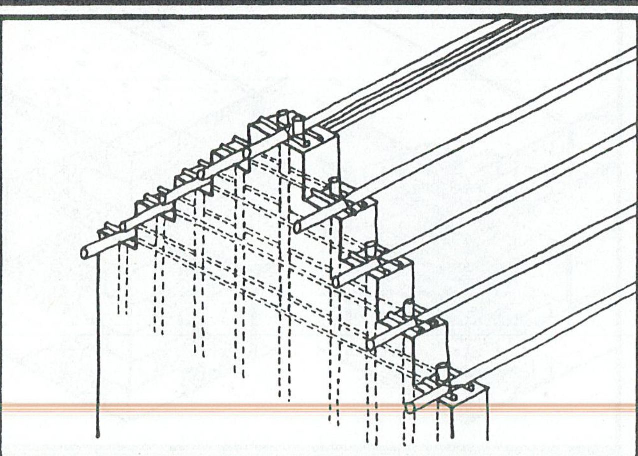
Il existe de nombreuses solutions de traitement des angles qui visent à les renforcer en employant la pierre, la brique cuite ou le mortier de chaux ou de ciment. Ces matériaux sont bâtis dans l'angle extérieur exposé à l'érosion, généralement dans la banche - pour le pisé - au fur et à mesure que l'on dame la terre. Les angles sont réalisés en harpes rectangulaires ou en dièdres qui assurent une bonne liaison entre matériaux "durs" et terre crue. Un cordon de mortier entre les deux matériaux améliore leur liaison. Les renforcements d'angle en cordons de mortier doivent être réalisés avec soin et régularité.











MURS RENFORCES

1 - OSSATURES, STRUCTURES

Pour répondre aux autres efforts que ceux qui agissent en compression, la tradition de construction en terre a développé des systèmes de renforcement des murs. On connaît notamment les techniques du colombage, le torchis sur clayonnage, la terre-paille en hourdage qui sont associés à des ossatures ou des structures en bois intégrées dans l'épaisseur des murs.

2 - CHAINAGES, ARMATURES

Les chaînages horizontaux et verticaux sont les systèmes de renforcement les plus employés.
Ce sont parfois des armatures localisées,disposées dans les parties les plus faibles des murs:angles, tableaux de baies p.e. Ces renforts sont en bois ou en fer (sous-appuis de baies p.e.), en treillis métalliques ou grillages (angles p.e.).
L'enduit grillagé est une "peau" renforcée qui ne doit pas cacher des malfaçons structurales majeures - coup de sabre p.e. - sous risque d'être inefficace. Le pisé à gabion est aussi un mode de renforcement des murs.
Pour des murs minces -brique de 29,5x14x9 cm posée en panneresse p.e.- on peut prévoir des systèmes de contreforts intégrés aux façades, au droit des tableaux de portes et fenêtres (simples redans vers l'extérieur) qui réduisent l'élancement des murs. Les murs sont aussi chaînés horizontalement au niveau des planchers ou de la toiture.
Pour les murs-pignons, on prévoit l'intégration d'un pilier dans l'axe du mur, parfaitement calepiné et harpé avec la maçonnerie du mur-pignon. Ce pilier raidit le panneau et améliore la résistance à la poussée des vents, reprend les charges depuis le faîtage. Un chaînage à la base du pignon reprend les poussées de la toiture.
Les systèmes de renforcement des murs en terre sont surtout développés dans le contexte de l'amélioration de la résistance des constructions en terre aux séismes. La plupart des zones sinistrables ont imposé des normes qui exigent l'emploi de renforcements verticaux et horizontaux (Pérou, Turquie, U.S.A. p.e.). Les solutions adoptées emploient des chaînages en bois ou en acier noyés dans les murs. Les angles et tableaux de baies sont particulièrement renforcés.

CHAINAGES

Le chaînage est particulièrement important pour assurer la stabilité des constructions en terre. En effet, les fissures et ruptures des murs de terre sont notamment le fait de :

- Tassements différentiels;
- Retraits, gonflements, dilatations thermiques;
- Tensions de rotation ou cisaillements(ouvertures et liaisons de murs p.e.);
- Tensions induites par les appuis de planchers;
- Poussées latérales du vent,de toitures en pente, d'arcs, de voûtes, de dômes.

Le chaînage permet de contrôler les effets néfastes de ces contraintes car il ceinture les murs dans toutes les directions, en continu. Pour assurer leur fonction, les chaînages doivent être rigides et indéformables (résistance à la traction).

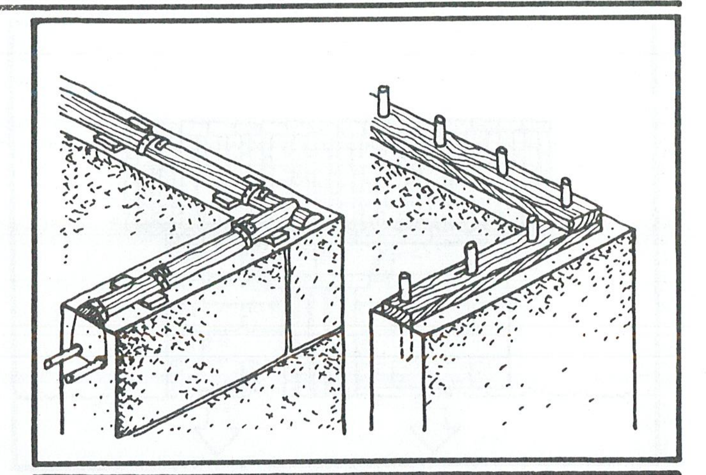
Le chaînage peut être employé à d'autres fins : répartition uniforme des charges, contreventement, linteau continu, support et ancrage des planchers et de la toiture. On connaît aussi des systèmes de chaînage intermédiaires, au niveau des appuis et linteaux de baies, notamment employés en zones sismiques. Mais, pour l'essentiel, les chaînages sont surtout localisés au niveau des planchers et des rives de toitures pour reprendre les charges et les poussées.

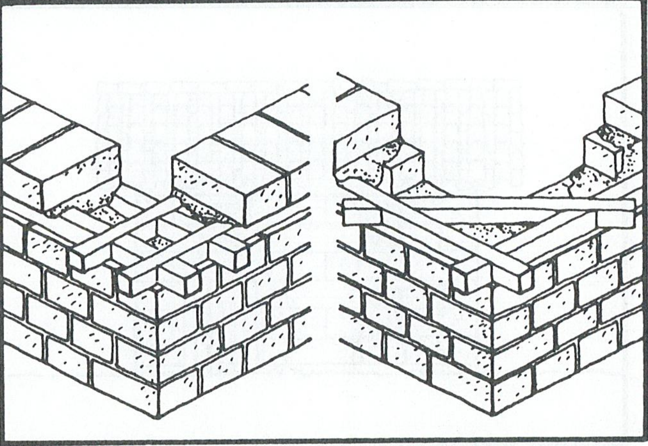
MATERIAUX

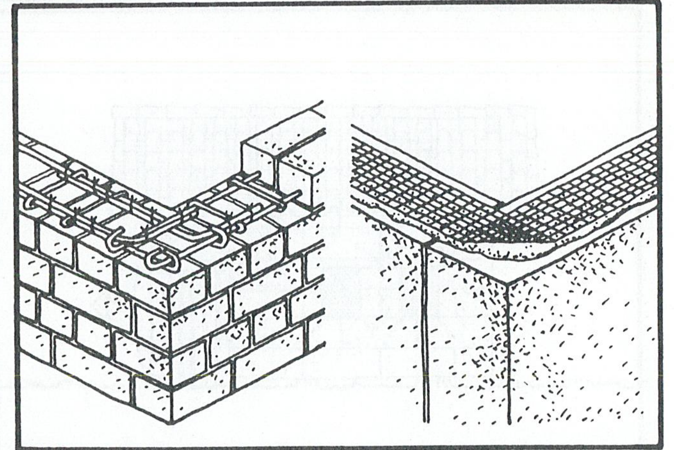
Les principaux matériaux employés sont le bois, l'acier ou le béton. Ces matériaux doivent avoir une bonne adhérence avec la terre pour assurer l'efficacité du chaînage.

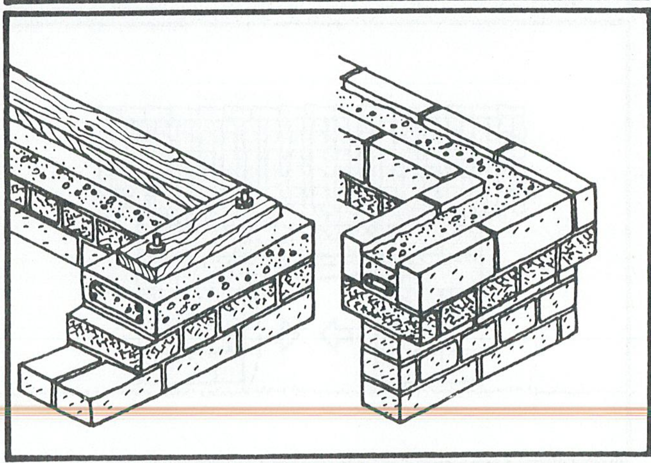
Les chaînages en bois sont souvent posés dans l'épaisseur des murs, à bain de mortier ou ancrés par des aciers et des colliers métalliques. Des solutions économiques et assez efficaces emploient des bois locaux (bambous, eucalyptus, p.e.). Le bois demeure sensible à l'eau et au feu, aux termites s'il n'est pas traité. Il est préférable d'employer des bois traités et secs, débarrassés de leur écorce.

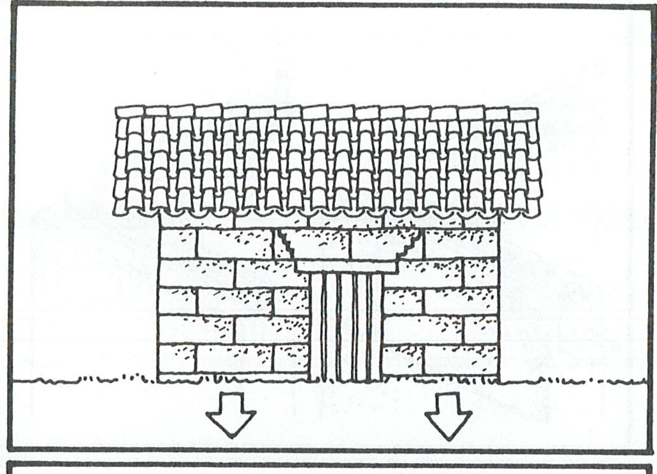
Les chaînages en acier doivent être convenablement ligaturés, surtout aux angles de murs et suffisamment enrobés de mortier ou de béton. Ce sont aussi des treillis métalliques. Il est conseillé de couler le chaînage en béton armé sur une couche de terre stabilisée pour assurer une bonne adhérence du béton à la terre et éviter une détérioration par le contact avec le matériau humide.

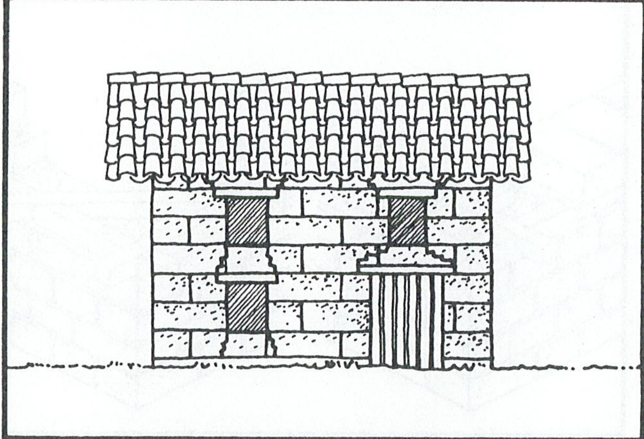


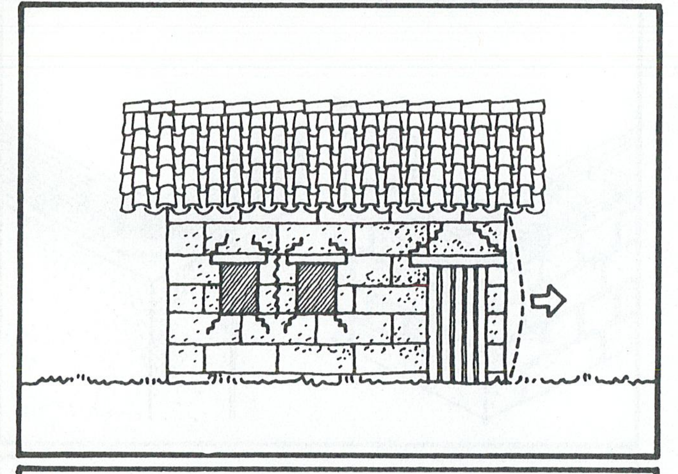


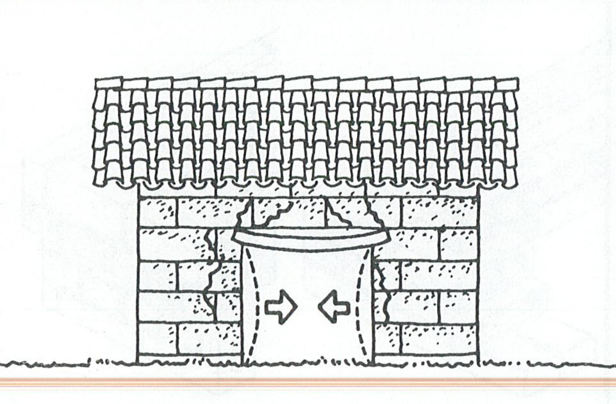












La liaison structurale entre les tableaux d'ouvertures et les murs de terre doit être particulièrement soignée, sous risque d'occasionner des fissures qui seront une voie d'érosion rapide, d'autant plus si s'ajoute une pathologie humide.

PATHOLOGIE STRUCTURALE

Une mauvaise reprise des efforts de cisaillement aux appuis, des linteaux sous-dimensionnés, des baies trop grandes provoquent des fissures au voisinage des tableaux. On peut aussi observer une désolidarisation des tableaux et des murs de terre notamment dans le cas d'un retrait du mur au séchage (pisé, bauge p.e.). Il faut donc éviter un certain nombre d'erreurs classiques :

- Des ouvertures trop grandes : surcharge du linteau et tassements différentiels.
- Le cumul des ouvertures dans un même panneau de mur et une trop grande diversité de tailles : affaiblissement du mur.
- L'ouverture trop proche de l'angle du bâtiment : flambement de l'angle.
- Des ouvertures rapprochées avec un trumeau trop faible : flambement du trumeau.
- Des jambages trop faibles.
- Un ancrage insuffisant du linteau et de l'appui: cisaillement.
- Une malfaçon structurale du mur près des ouvertures : coup de sabre p.e.

PATHOLOGIE HUMIDE

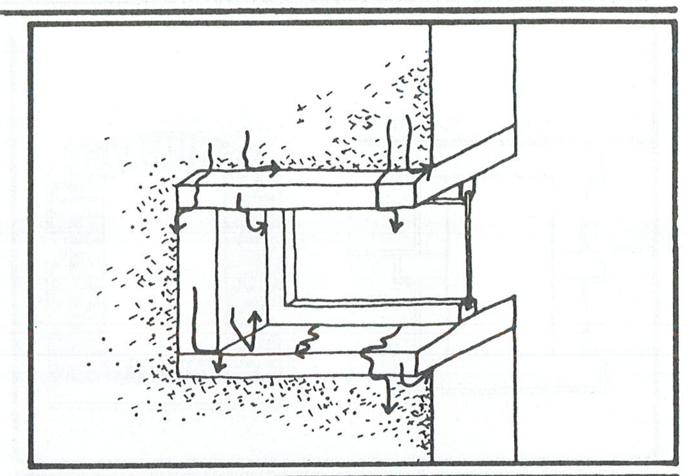
La pathologie de fissuration est une voie libre à l'érosion par l'eau du fait des ruissellements (1), du rejaillissement (2), des infiltrations (3), d'une stagnation de l'eau. Les points les plus fragiles sont les liaisons linteau/murs de terre (ancrage), jambages/murs (harpage et scellements) et appui/murs (ancrage). De même les feuillures et ébrasements doivent être renforcés ainsi que tous les scellements de chambranles, de gonds ou de paumelles (volets).

Il est recommandé de prévoir :

- Un lamier sous le linteau et sous l'appui, en façade, ou des systèmes de bandes solin qui rejettent l'eau. Eviter les saillies non appropriées en linteau et en jambages.
- Solutionner tous les problèmes de condensation (ponts thermiques p.e.).
- Stabiliser le mur de terre au voisinage du tableau de baie (sous l'appui notamment).
- Adopter si possible des solutions de couvre-joint ou d'enduissage du tableau en façade.
- Une étanchéité sous l'appui.

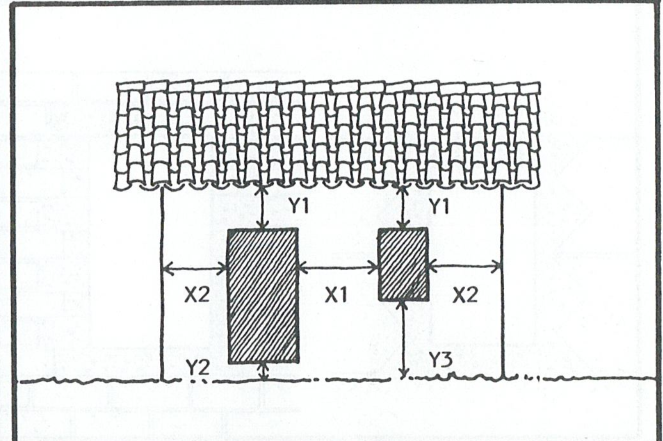
ASPECTS MECANIQUES

Les tableaux de baies doivent être largement dimensionnés : grande inertie du linteau et de l'appui, stabilité des jambages. Il faut assurer une bonne reprise des charges concentrées. Le tableau peut être traité en bois ou en maçonnerie (veiller au travail différentiel entre le tableau et le mur). L'ouverture peut être percée après séchage du mur mais l'on aura pris soin de poser le linteau par avance.



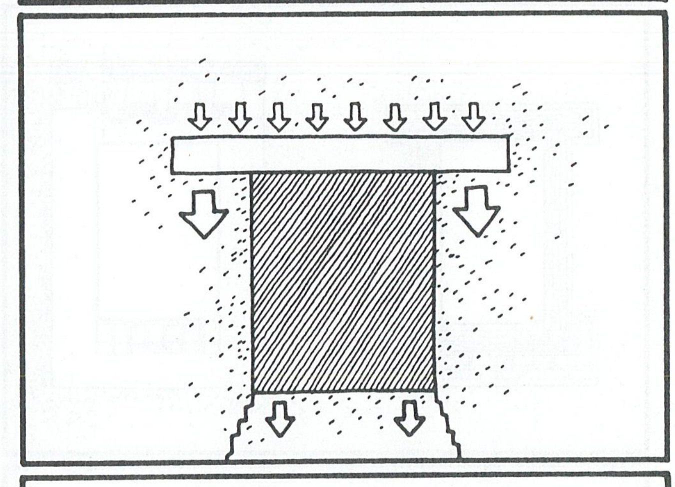
1 - LINTEAU

Il peut être en bois ou en maçonnerie de béton, de pierre ou de brique, être coulé sur place ou préfabriqué.
Le linteau est très sollicité. Il faut augmenter la longueur d'appui du linteau dans le mur (pas inférieur à 20 cm, plus pour les grandes baies). Il est cependant conseillé d'augmenter la résistance à la compression des murs au droit des appuis du linteau : stabiliser les jambages ou les traiter en maçonnerie.



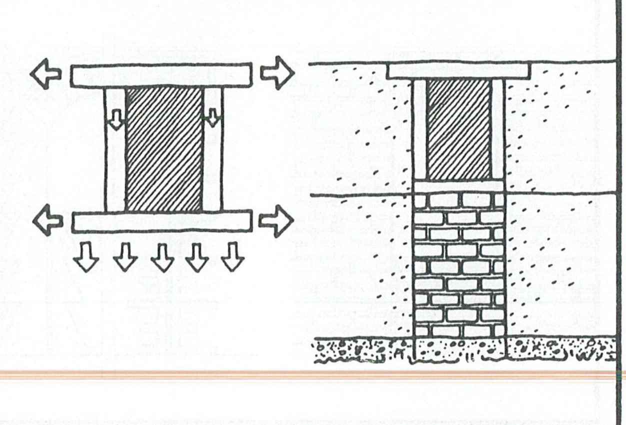
2 - APPUI

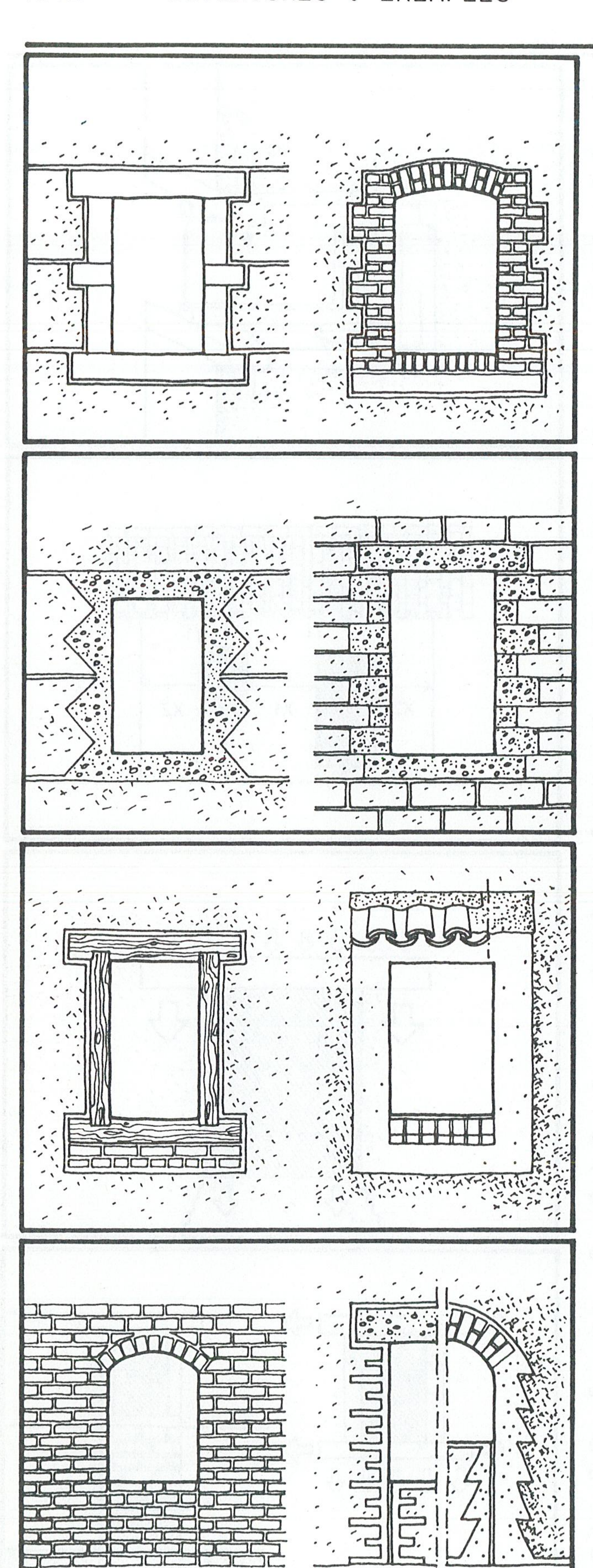
Les charges transmises par les jambages doivent être bien reprises : prolonger l'appui, incorporer des armatures sous l'appui. Afin d'éviter le cisaillement de l'allège, il est préférable d'adopter la solution des joints secs entre l'allège et le mur ou celle de l'allège indépendante traitée en remplissage après la construction du mur : mur en pisé, allège en briques crues p.e. Il ne faut pas oublier de colmater ultérieurement les joints secs d'allège lorsque le mur est définitivement sec et stable.



3 - DIMENSIONNEMENT

Les règles suivantes, indicatives, n'excluent pas une variété de conception des ouvertures.
- Le rapport des vides et des pleins, dans un même mur n'est pas supérieur à 1/3 et le plus régulièrement réparti. Eviter les concentrations de vides ou les trop grandes ouvertures.
- La longueur cumulée des ouvertures ne dépasse pas 35 % de la longueur du mur.
- Les portées classiques se limitent à 1,20 m. Surdimensionner les linteaux et les jambages pour les plus grandes baies.
- La distance minimale entre une baie et un angle de mur est de 1 m.
- La largeur d'un trumeau n'est pas inférieure à l'épaisseur du mur et à un minimum de 65 cm. Le trumeau n'est pas porteur à moins de 1 m de large.
- Respecter un rapport de hauteur suffisante d'allège (sous-appui) et de retombée (sur linteau) par rapport à la largeur de la baie. Le tableau pourra être renforcé : armatures sous l'appui p.e.





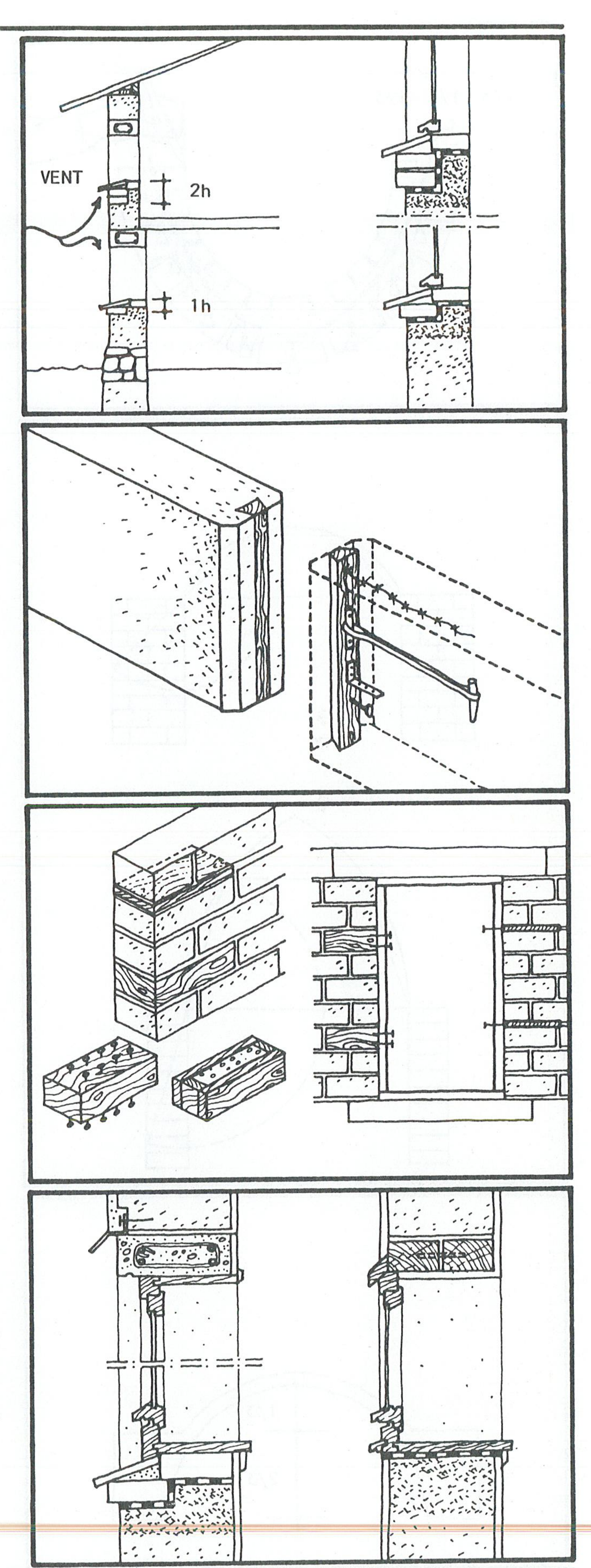
Les tableaux d'ouvertures peuvent être traités en matériaux "durs" pour assurer une bonne reprise des charges et des efforts. Ce principe facilite l'ancrage ou le scellement des menuiseries mais la mise en oeuvre est plus délicate : problème de la liaison entre matériaux "durs" et mur de terre.

MATERIAUX

- Les tableaux en pierre ou en brique peuvent être constitués de linteaux droits ou en plate-bande, ou en arcs aux formes diverses : surbaissés, en segment, en anse de panier, en plein-cintre, etc.. Les jambages sont massifs ou à éléments (brique p.e.); des blochets peuvent harper les jambages aux murs. Ces harpes peuvent être rectangulaires ou triangulaires et la liaison aux murs de terre est assurée par un cordon de mortier qui s'interpose entre le tableau maçonné et la terre. Les appuis sont soit massifs (pierre ou béton p.e.) soit en maçonnerie d'éléments (briques posées sur leur chant p.e.).
- Le béton permet de réaliser des tableaux monolithiques, coulés en même temps que l'on élève les murs de terre ou même préfabriqués. Il faut assurer une bonne liaison entre le béton et la terre (harpes) et éviter les saillies du béton par rapport au nu du mur de terre.
- Les tableaux en bois sont très couramment employés. Le linteau, les jambages et l'appui forment un cadre rigide. Ce cadre peut être soit posé en parement extérieur soit constitué un ensemble massif qui prend toute l'épaisseur du mur. Une pénétration suffisante du linteau et de l'appui dans le mur de terre assure une bonne liaison structurale des matériaux. Il est néanmoins préférable de poser les pièces de bois sur un lit de mortier ou même sur des briques maçonnées. Dans les régions à climat humide, il vaut mieux enduire ces tableaux en bois (piquetage ou cloutage du bois) et prévoir un solin au-dessus du linteau.
- Les tableaux peuvent être réalisés en terre stabilisée ou renforcée. Dans des murs en blocs comprimés stabilisés, le linteau peut être remplacé par un arc en briques. Les jambages sont parfaitement calepinés et l'allège peut être indépendante, construite après les murs et les arcs. Les petites ouvertures peuvent être réalisées en encorbellement avec un appareil soigné. Dans un mur en pisé, le linteau peut être en bois ou en arc de briques et les jambages renforcés par des lits de mortier de chaux ou des harpes triangulaires en mortier. Il faut veiller à chanfreiner les angles saillants pour réduire l'érosion.

PROTECTION DES TABLEAUX D'OUVERTURES

Les tableaux d'ouvertures doivent être protégés de l'érosion de l'eau et du vent qui peut être très importante sur un terrain de pathologie de fissures. Cette protection est assurée par une mise en oeuvre soignée des tableaux et par une bonne liaison structurale des matériaux mais peut être améliorée par une stabilisation de surface ou un enduissage autour du tableau.
Pour les maisons à étage, sur les façades orientées aux vents dominants, les ouvertures d'étage sont plus exposées que celles du bas, notamment au niveau des appuis. La brisure du vent crée des tourbillons notamment sensibles à hauteur de l'allège de la baie d'étage et du linteau de la baie du rez-de-jardin. Il convient donc de stabiliser ces parties exposées. L'appui de la baie haute ne doit pas être trop débordant (érosion du vent). Il ne faut pas oublier de poser une étanchéité entre l'appui de baie et le mur de terre, le solin en linteau et les larmiers en sous-face de linteau et d'appui.

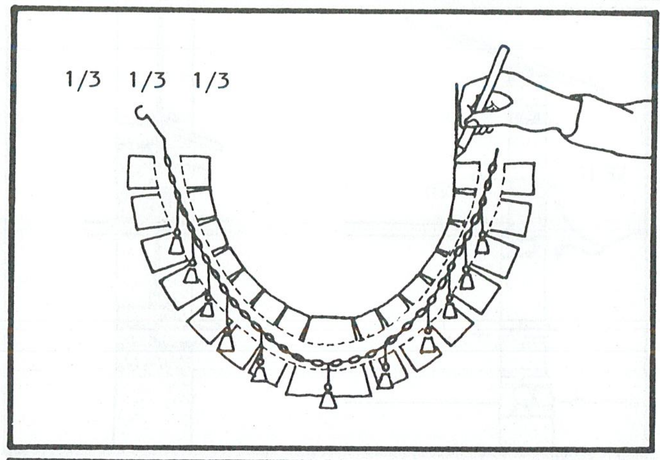


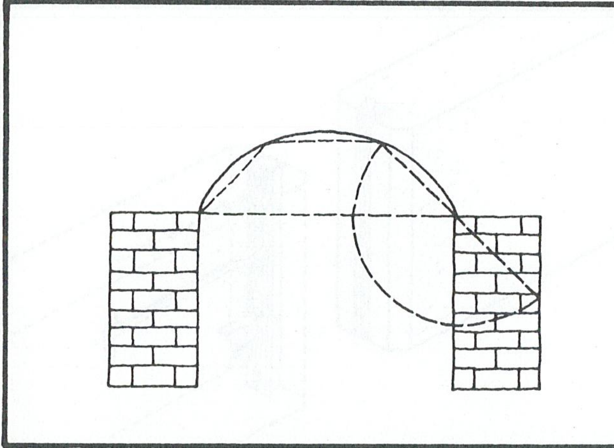
SCELLEMENT DES PRECADRES

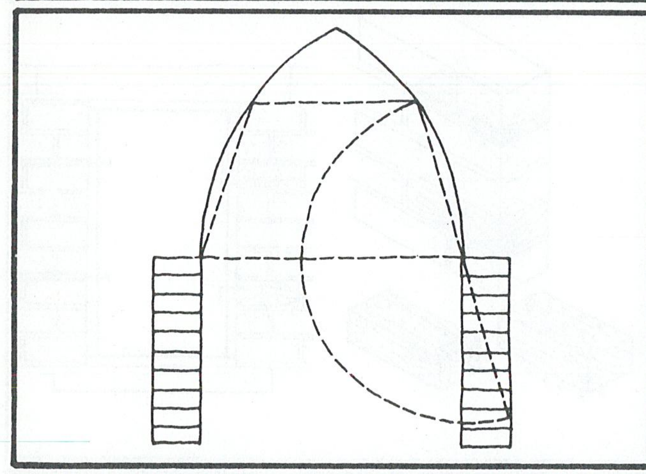
Lorsque l'on prévoit de sceller directement les précadres de portes et fenêtres dans les murs de terre, il faut veiller à une bonne solidité de l'ancrage car les vibrations et les chocs dus à une manipulation fréquente des menuiseries peuvent provoquer des fissures et désolidarisations. On peut prévoir de noyer des pièces de bois dans la masse des murs de terre qui recevront ultérieurement le chambranle des ouvertures. Le scellement de ces pièces de bois (planches en pied-droit ou blocs spéciaux) est assuré par des pattes métalliques ou par un cloutage et une pose à bain de mortier, par des tirants en fils de fer barbelés qui sont noyés dans le mur au fur et à mesure que l'on élève la maçonnerie des pieds-droits.

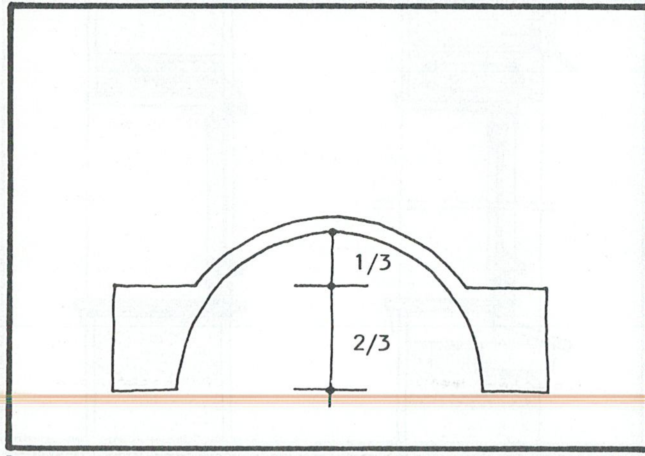
MENUISERIES

Elles doivent être réalisées avec soin et munies de larmiers en sous-face du linteau et de l'appui si elles sont positionnées au nu de la façade. Si les menuiseries sont positionnées en retrait, l'appui doit être muni d'un regingot et doit être pentu pour évacuer l'eau. Il faudra veiller également à un bon scellement des gonds de volets, en feuillures maçonnées ou renforcées. L'étanchéité sous l'appui ne doit pas être oublié.









L'arc permet de franchir des vides menages dans les murs, avec le matériau terre qui est sollicité en compression.

FORMES DE L'ARC

Les plus adaptées à la construction en terre sont:
- plein-cintre et plein-cintre surbaissé;
- anse de panier, pleine et surbaissée;
- ogive et ogive surbaissée;
- Tudor, éliptique et en plate-bande;
- caténaire et parabolique.

DIMENSIONNEMENT DE L'ARC

Le trajet des forces, à l'intérieur de l'arc peut être différemment évalué : par calcul, par approche graphique (tracé du funiculaire des charges) ou par simulation (petite chaîne lestée de poids). La courbe définitive de la ligne de pression doit rester dans le 1/3 moyen de l'arc. Si la courbe sort de ce 1/3 moyen,des fissures sont à craindre. Le tracé en caténaire (chaînette pendue) simule la portance du propre poids de l'arc mais ne simule pas la situation d'un arc chargé.
Deux solutions principales de dimensionnement :
- La forme de l'arc est déterminée par avance. Le tracé de la ligne de pression doit passer dans le 1/3 moyen de l'arc auquel on donne l'épaisseur nécessaire.
- On détermine le trajet des forces et l'on adapte ensuite la forme et l'épaisseur de l'arc à ce trajet.
Mais, le calcul ne reflète pas l'exacte réalité car la maçonnerie qui charge l'arc n'est pas passive. Elle a sa propre cohésion et forme son propre arc en encorbellement (déjà observé au-dessus de parties de murs effondrés avec une portée jusqu'à 7 m). Le trajet des forces reste hypothétique dans ce cas. Il est donc impératif, surtout pour les grandes portées, de soigner la construction des arcs afin d'éviter les fissures et désolidarisations.

DIMENSIONNEMENT DES PIEDS-DROITS

Les arcs transmettent de fortes poussées sur leurs naissances et sur les pieds-droits qui les soutiennent. Ceux-ci doivent donc être solides et stables. Ces poussées peuvent être calculées ou évaluées graphiquement(polygone de Maxwell-Cremona p.e.). On peut aussi évaluer le dimensionnement des pieds-droits par une méthode empirique : le prolongement du 1/3 de l'arc doit toujours être situé dans le pied-droit. Quand deux arcs de même tracé se rejoignent sur un même pied-droit, les poussées s'annulent. Dans ce cas, on ne prend en compte que la descente de charge verticale.

EXECUTION DES ARCS

1 - ROULEAUX

Suivant les portées et les charges, l'arc peut être construit en simple,double ou triple rouleau. Un cintre léger permet de construire le 1° rouleau qui sert de base pour le 2°, etc ... Mais, ces rouleaux successifs doivent être bien chargés et liés entre eux pour qu'il n'y ait pas de fissures (risque de retrait et de travail différentiel entre les rouleaux). On peut appareiller ces rouleaux successifs entre eux mais l'exécution est plus délicate.

2 - COFFRAGES

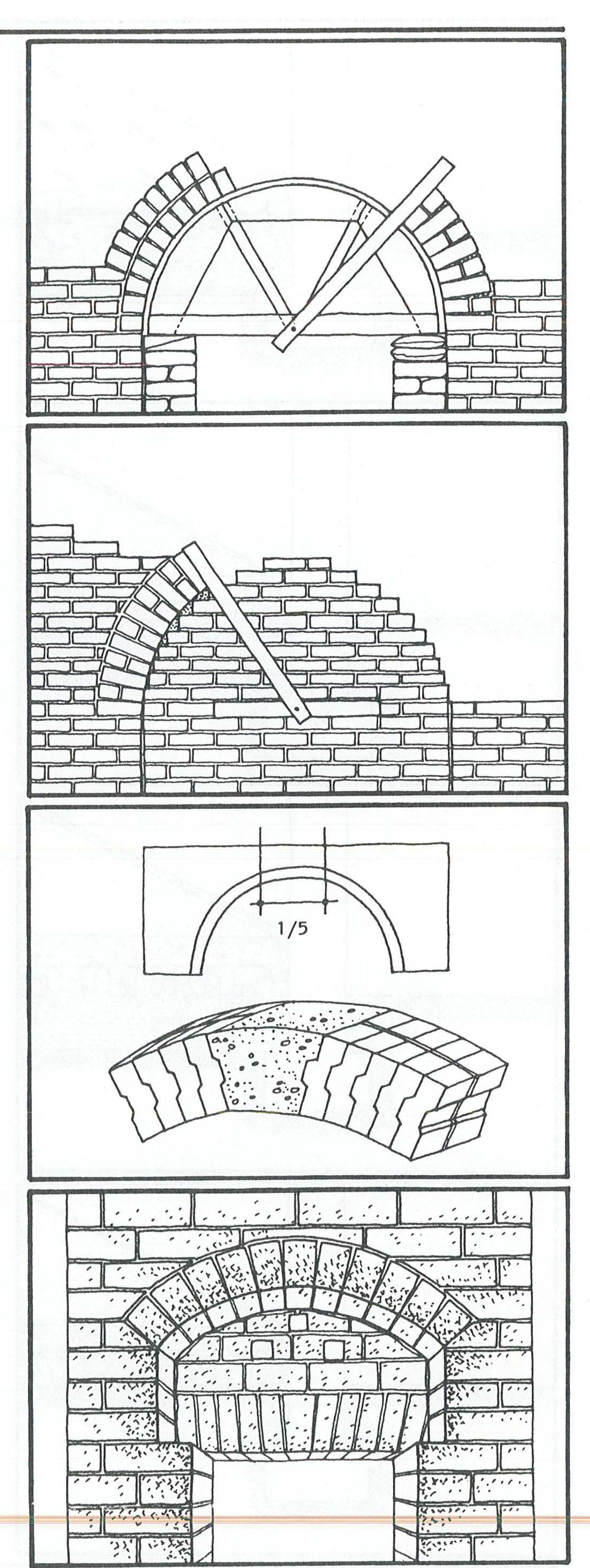
La pose en encorbellement permet de se passer de coffrage (tracé qui approche l'ogive) mais les autres formes exigent un support de mise en oeuvre. Les coffrages peuvent être en bois ou en métal,en maçonnerie temporaire ou même plus légers (coffrage en tige de palmier p.e., dissimulé sous l'enduit). Les cintres sont préférablement équipés d'une latte mobile ou d'un cordeau qui donne la direction de pose des briques-voussoirs. On prévoit aussi un décoffrage aisé par un système de calage avec des coins en bois ou des petits sacs de sable qui permettent d'abaisser le coffrage sans solliciter l'arc (risques de fissures).

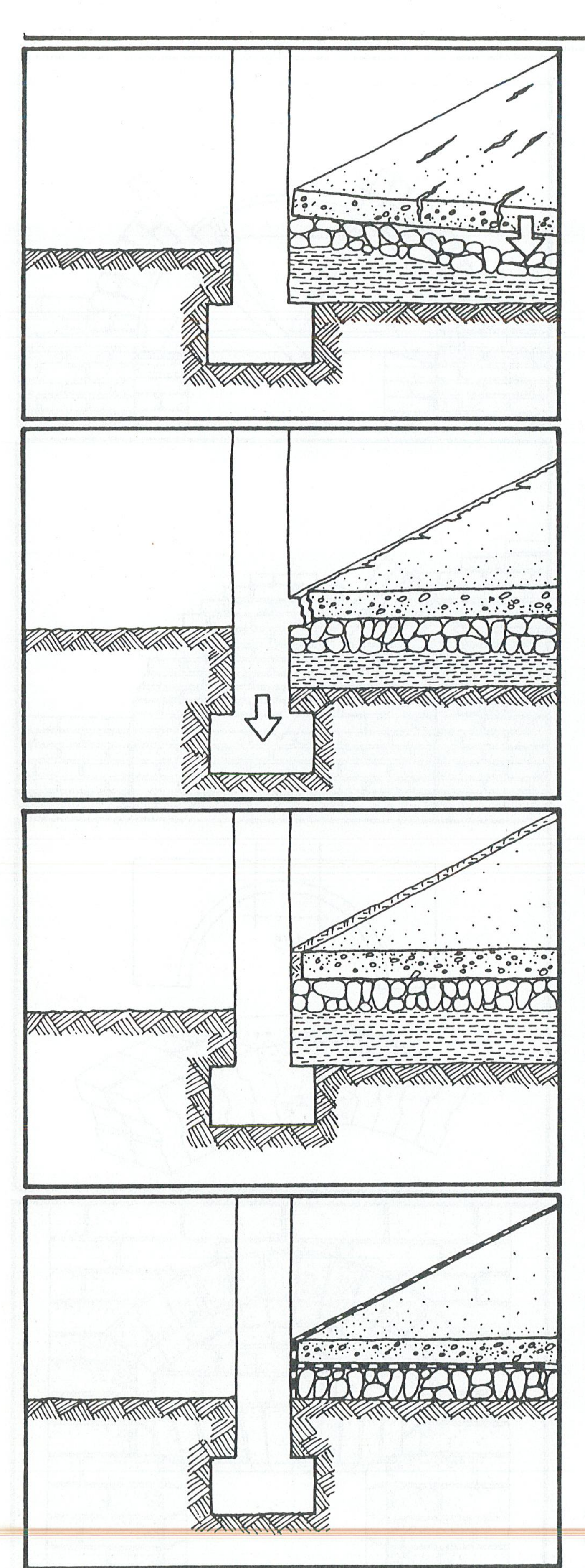
3 - MACONNERIE

Les arcs en adobe ou en blocs comprimés stabilisés sont bien calepinés : correspondance des hauteurs de joints entre la maçonnerie et l'arc. La mise en oeuvre est symétrique, à partir des deux sommiers de l'arc pour rejoindre la clef. Les sommiers sont inclus au mur et taillés pour donner la direction de l'arc et mieux reprendre les poussées. Par principe, on ne compte pas sur le mortier pour le travail de l'arc mais sur les briques comme si elles étaient posées à sec. Les briques se touchent à l'intrados, côté cintre, et sont calées à l'extrados par un caillou. Le bourrage des joints doit être très soigné. On peut prévoir des briques-voussoirs spéciales (en trapèze ou à emboîtement) qui s'opposent au glissement. Ces briques sont meilleures pour les grandes portées et l'on construit en même temps l'arc et la maçonnerie qui le charge. La clef sera de préférence en un matériau modulé sur place et assez large (40 cm). Pour une pose à sec, le décoffrage peut être immédiat. Si l'on a compté sur le mortier, un délai de séchage s'impose avant d'ôter le coffrage.

4 - MENUISERIES

Soit elles épousent la forme de l'arc, soit l'on pose un linteau sous le tympan qui est obturé en maçonnerie légère.





Dans la construction en terre traditionnelle, les pavements en terre sont courants. Ces ouvrages, bien exécutés, sont résistants, esthétiques, sains et économiques. Ces types de sols ne sont plus guère employés dans la construction moderne mais mériteraient d'être réhabilités.

Pour réaliser un pavement en terre, il convient de suivre certaines règles et de prendre quelques précautions car le pavement doit résister au poinçonnement, à l'usure, aux attaques de l'eau, aux charges mobiles et immobiles qu'il doit répartir de façon uniforme et transmettre au terrain dont il doit parfois améliorer la portance,être isolant (thermique et acoustique), être facile à entretenir, esthétique (texture, couleur), pouvoir accueillir des équipements dans son épaisseur(réseau électrique p.e.).

Les pavements en terre sont surtout utilisés pour bâtiments et espaces annexes : hangars, remises p.e. Dans les caves, leur emploi dépend de la perméabilité du terrain sous-jacent et de la profondeur de la nappe phréatique (min. 3 m), de la bonne aération de la cave. D'une manière générale, les pavements en terre peuvent être employés pour des espaces secs et bien aérés, sur des sols bien drainés et secs. Leur emploi est aussi fréquent pour les pièces d'habitation (séjour, chambres p.e.) mais cela exige une finition très soignée et une conception plus élaborée (isolation p.e.). Leur résistance est élevée, jusqu'à 350 daN/cm² pour des charges ponctuelles.

TASSEMENT DIFFERENTIEL

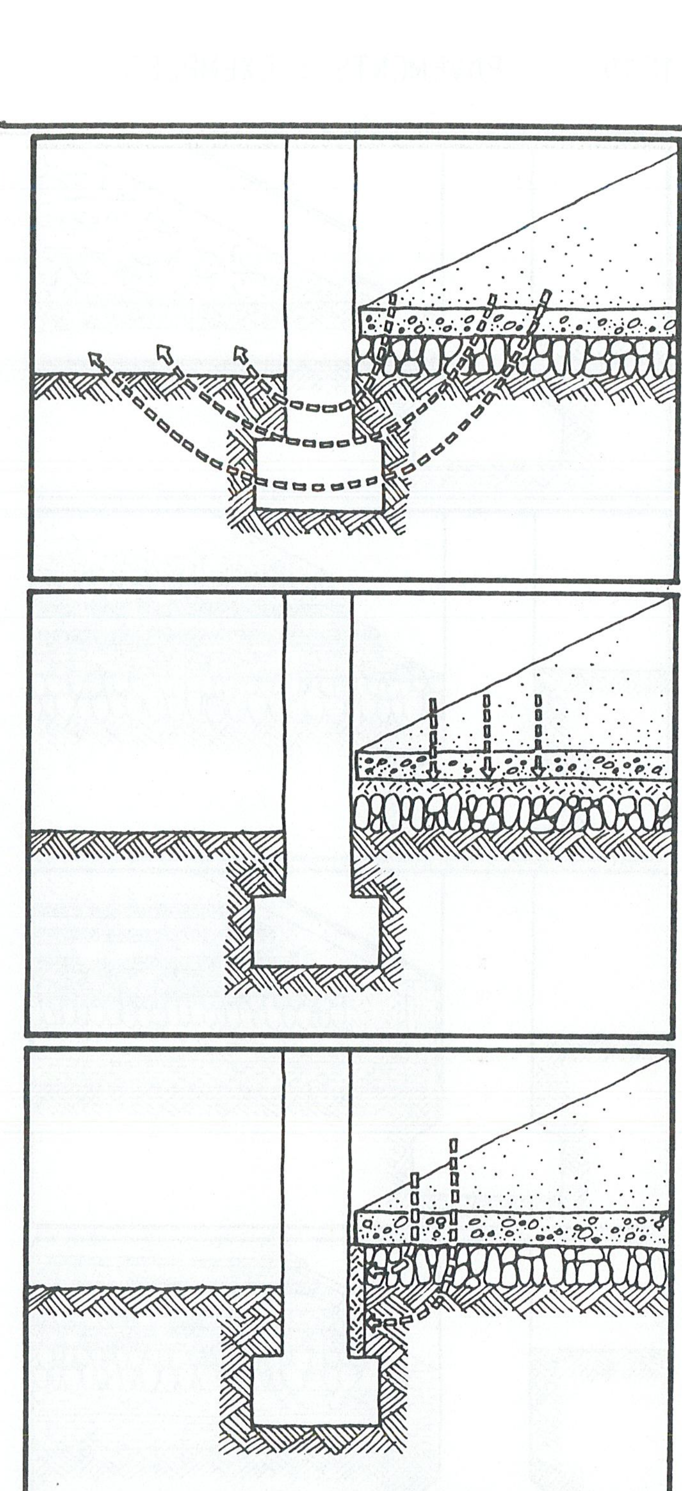
Les pavements et les murs travaillent différemment; les murs supportent des charges plus importantes que celles appliquées au dallage. Il convient donc de dissocier le pavement des murs pour éviter des fissures de tassement et de travail différentiel. La barrière étanche appliquée contre le massif de fondation devra être flexible et résistante pour ne pas être altérée par le travail différentiel des 2 ouvrages. L'aménagement du sol sous-jacent qui recevra le pavement en terre devra être soigné pour éviter des tassements : décapage uniforme, remblai éventuel, compactage.

DIMENSIONNEMENT

L'épaisseur varie selon la portance du terrain sous-jacent,les contraintes de charges appliquées, la finition choisie. Un pavement comprenant hérisson en pierres, forme de sable et terre damée peut être épais de 45 cm.

PROTECTION CONTRE L'EAU

Les pavements en terre doivent être protégés de l'eau et notamment des remontées capillaires. Suivant la mesure du terrain, il peut être nécessaire de prévoir un hérisson de pierre, une ventilation de ce hérisson, une barrière étanche. L'humidité du sol, par capillarité, ne doit pas pouvoir remonter dans les murs soit à partir des fondations ou à partir du pavement. Ou bien le pavement est perméable et permet l'évaporation de l'humidité, ou bien il est étanche, à l'égal des fondations. La barrière étanche doit être posée avec soin sur un sol qui ne la détériorera pas ultérieurement et rejoindre la barrière étanche du mur. Il est donc préférable de prévoir une forme de sable sur laquelle reposera la barrière étanche. Le niveau fini du pavement se situera au-dessous du niveau fini du soubassement qui aura lui aussi reçu une barrière étanche (notamment entre le soubassement et le mur de terre). Il est aussi préférable de prévoir une plinthe qui finira le joint entre le pavement et le mur. La fixation de cette plinthe ne détériorera pas la barrière étanche verticale. Les autres formes d'attaque de l'eau peuvent résulter de l'emploi quotidien de l'eau : lavage des sols, ou de problèmes de condensation (ponts thermiques), de défectuosités des canalisations. On veillera donc à solutionner tous ces problèmes.



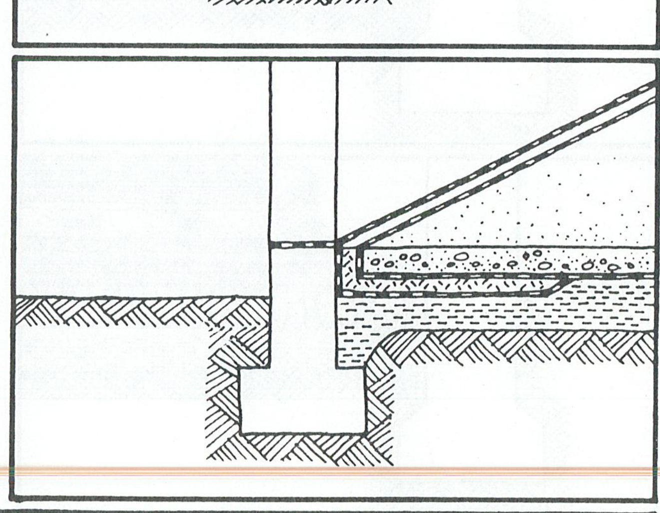
ISOLATION THERMIQUE

Les pavements en terre sont peu isolants notamment en périphérie. On peut donc envisager la pose d'un isolant thermique périphérique. On veillera à employer un isolant résistant aux poinçonnements.

DURABILITE

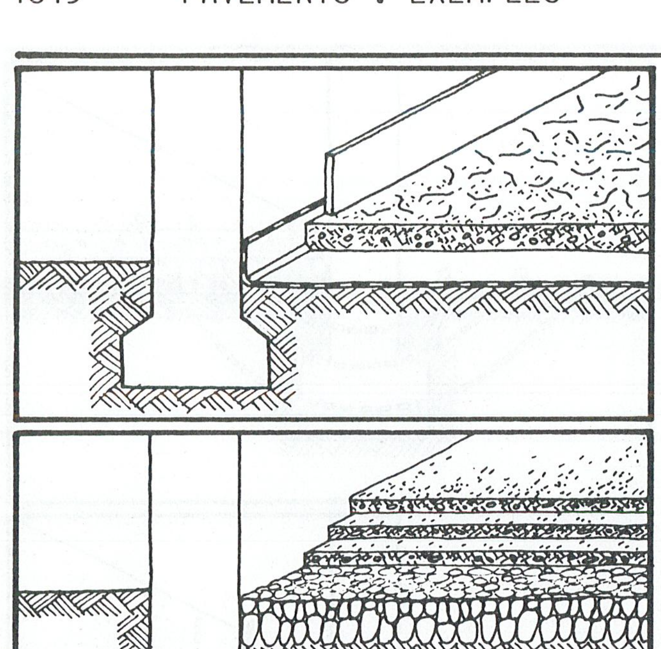
1 - STABILISATION

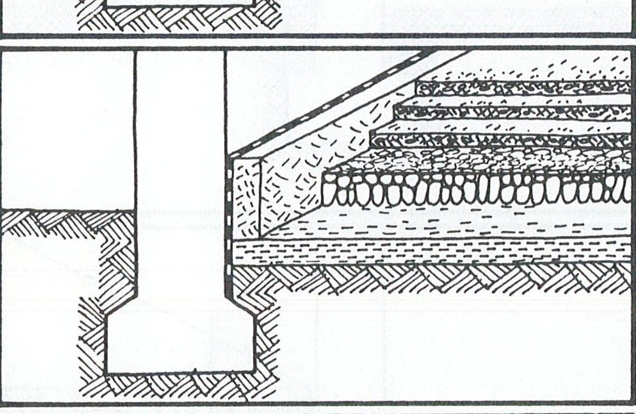
On stabilise soit dans toute l'épaisseur du pavement, soit pour les couches de surface (plus économique). Les adjuvants sont ceux employés pour la production de terre stabilisée et les modes opératoires sont similaires. On peut aussi ajouter des colles végétales (colle blanche p.e.). La stabilisation améliore considérablement la résistance à l'eau et à l'usure des pavements en terre.

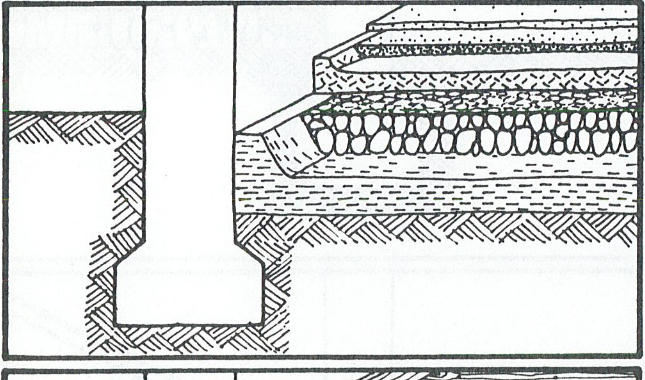


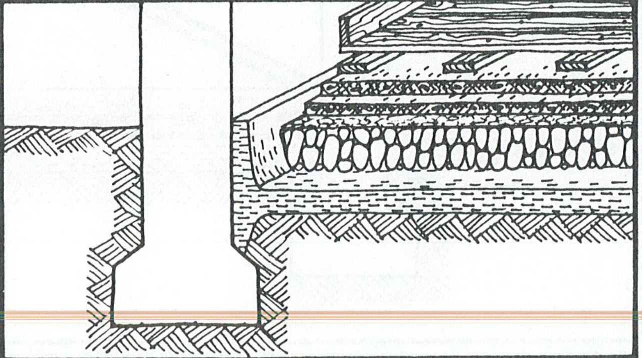
2 - DURCISSEURS DE SURFACE

La tradition utilise l'urine animale (cheval) et le sang de boeuf, sur des pavements en terre secs. Le sang de boeuf est saupoudré de cadres ou de machefer puis battu. On peut également employer les silicates de soude (pavement pas tout à fait sec) ou les fluates (pavement sec). On peut aussi utiliser des huiles de moteur ou un mélange de térébenthine et d'huile de lin. La finition se fait à la cire polie.









MISE EN OEUVRE

1 - **PREPARATION** : avant de réaliser le pavement en terre, il convient de préparer le terrain sous-jacent. La couche de terre végétale et humifère est soigneusement décapée et débarrassée de tout résidus organiques. La couche supérieure du terrain est ensuite damée sauf si le sol est sujet à un risque de gonflement ou si sa portance est suffisante. Le terrain doit être sec avant de commencer le pavement (drainage si nécessaire).

2 - **ETANCHEITE** : une barrière anticapillaire peut être réalisée avec une épaisseur de terre argileuse (10 cm) appliquée à l'état humide en couches damées avec soin. Chaque couche doit être sèche avant d'être recouverte et les microfissures rebouchées. La dernière couche est finie à la batte après damage. Une terre sableuse stabilisée au bitume ou à la chaux peut remplacer la terre argileuse. On peut aussi employer la terre stabilisée ou une feuille de plastique. Quelle que soit la solution, la barrière étanche doit remonter contre la base du mur.

3 - **EMPIERREMENT** : un hérisson de pierres sèches de 20 à 25 cm donnera une bonne base. Les plus grosses pierres sont disposées en premier et jusqu'aux graviers coulés. La pierre sèche peut être remplacée par des graviers et gros sables, par du ballast.

4 - **ISOLATION** : le hérisson est recouvert d'une couche d'isolation qui peut être réalisée en terre paille sur une épaisseur d'environ 10 cm. Ce matériau étant trop flexible, on prévoira de le recouvrir d'une couche de portance qui assurera une bonne répartition des charges.

5 - **PORTANCE** : cette couche peut être réalisée en terre argileuse mêlée de paille coupée ou en terre-paille avec une paille dure et finement hachée (brins de 4 à 6 cm)que l'on ajoute de mortier de ciment : 1 volume de ciment pour 6 volumes de sable lavé. Cette couche de portance est épaisse de 4 cm et toujours sur-stabilisée pour qu'elle devienne dure après sa cure de séchage. Cette cure peut nécessiter une humidification (sacs humides).

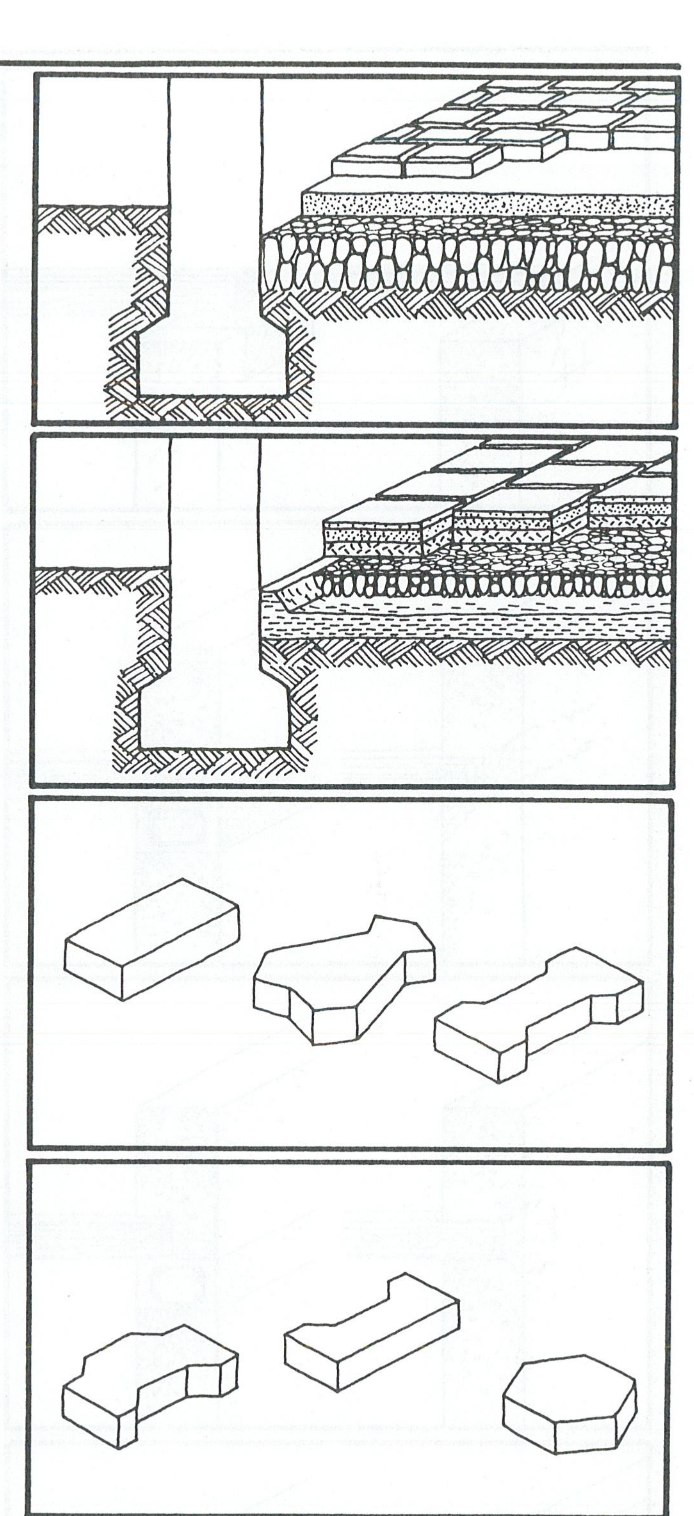
6 - **FINITION** : on peut prévoir une fine couche de coulis de ciment ajouté de sable fin ou un traitement à base d'huiles. On peut aussi ajouter à ce coulis une charge légère : sciure de bois. Le dosage : 1 vol. de sable, 1 vol. de ciment, 1 vol. de sciure. La sciure est auparavant trempée dans un bouillon de chaux ou ciment et séchée pour être minéralisée. On peut finir en colorant le sol ou en le cirant.

PAVEMENTS MONOLITHIQUES

Le mortier courant d'adobe, stabilisé au bitume, peut être employé pour réaliser des pavements. Le sol est convenablement préparé puis le mortier est coulé, tiré à la règle après avoir positionné des guides de niveau (linteaux p.e.). Les fissures de retrait seront rebouchées avec un mortier d'adobe plus fin et une finition est faite à la truelle. Après séchage, la surface est traitée avec un mélange de térébenthine et d'huile de lin avec un séchage d'une semaine entre chaque couche. On peut ensuite cirer le pavement et le polir.

Le mortier de béton de terre stabilisé (1 part de ciment pour 6 à 8 parts de terre sableuse) convient également, en couche de 5 cm réglée avec des jalons. La surface pourra être lissée après saupoudrage de ciment. Prévoir des joints de contraction tous les 1,50 m environ, profonds et bien marqués - 3 cm de profondeur et ½ cm de large.

Les autres types de pavements monolithiques sont réalisés en terre damée - sensible à l'humidité - en terre damée stabilisée, en terre-paille stabilisée et damée. On peut aussi prévoir une isolation, périphérique, et un plancher en finition (plus coûteux). Ces pavements en terre sont désolidarisés des murs, un joint flexible peut être réalisé en terre-paille.

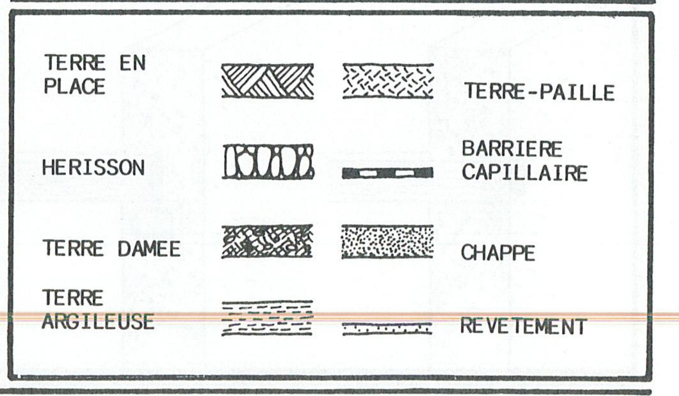


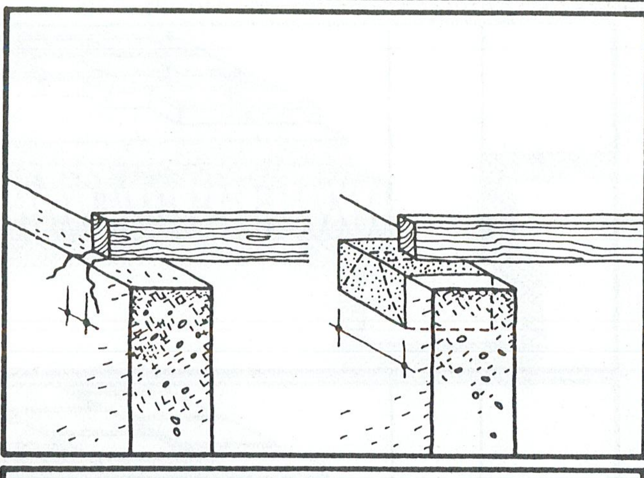
PAVEMENTS EN ELEMENTS

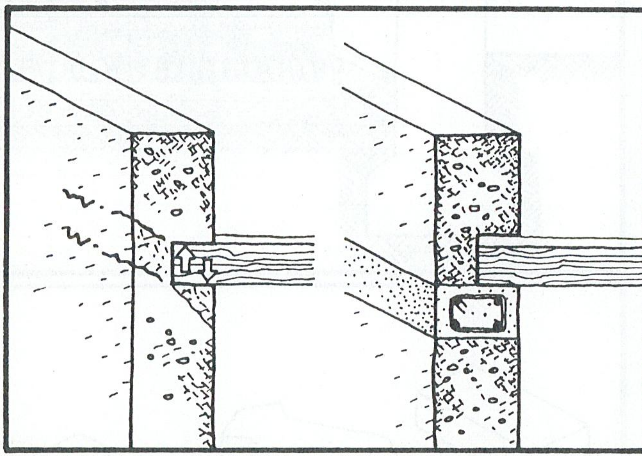
Des briques ou carreaux de terre stabilisée peuvent être posés sur une couche de mortier (2 cm): 1 part de ciment pour 6 parts de terre sableuse. On veillera à une bonne adhérence des carreaux au mortier. Les joints peuvent être remplis avec du lait de ciment. Les blocs employés doivent être surstabilisés ou revêtus d'une couche d'usure. On peut aussi envisager de poser ces blocs sur une forme de sable et boucher les joints au sable.

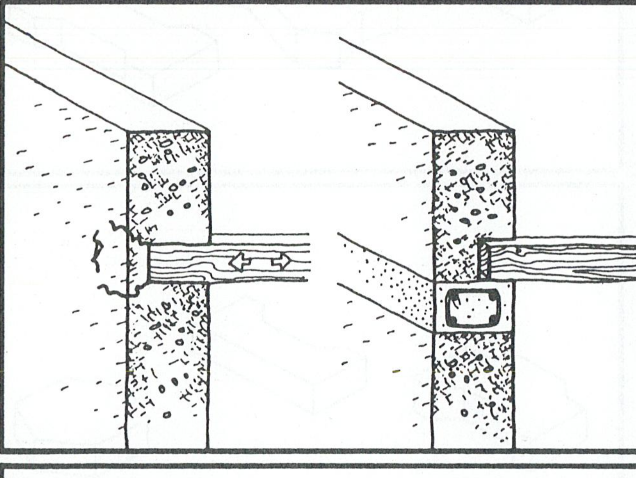
Les pavés peuvent être étudiés dans leur forme ou même leur coloration (ajout d'oxydes dans la terre). La forme doit toutefois demeurer simple afin de ne pas compliquer l'opération de moulage, surtout lorsque l'on emploie une presse. Pour une bonne résistance à l'usure, tous les angles des blocs sont au moins égaux ou supérieurs à 90°. Leur épaisseur est de 6 à 9 cm et l'on peut envisager un traitement bicouche avec surface d'usure surstabilisée.

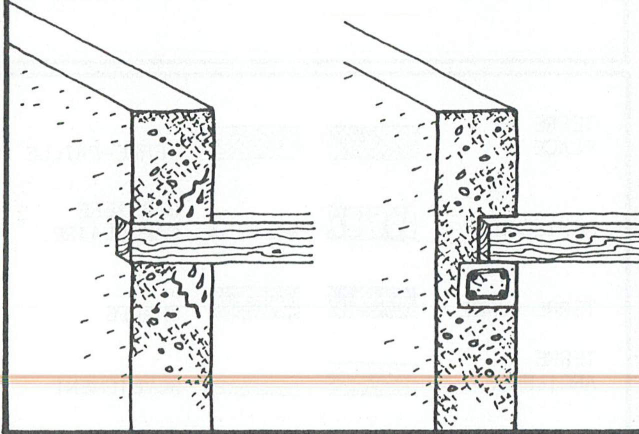
Des pavements en pavés de terre-paille (40x40x16 cm) revêtus d'une chape d'usure et durcis (fluates p.e.) sont isolants.











On trouve des planchers à différents niveaux :
- au-dessus d'une cave ou d'un vide sanitaire;
- à l'étage, sous les combles;
- en toiture plate.

Différentes parties constituent un plancher :
- le dessus (sol);
- le corps (charpente ou dalle);
- le dessous (plafond).

Chacune des ces parties impose des contraintes au matériau terre employé pour leur composition ainsi que des problèmes spécifiques : appui notamment. Mais, en principe, tous les planchers classiques peuvent être employés.

EXIGENCES ET CONTRAINTES

Le dessus ou sol ou revêtement, doit résister à l'usure et être durable, être plane et agréable à la vue, facile à entretenir, être étanche dans le cas d'une toiture plate.
Le corps ou charpente ou dalle, doit supporter les charges mobiles et immobiles, résister aux poinçonnements, être très rigide et bien transmettre les charges aux appuis.
Le dessous ou plafond doit être agréable à la vue.

LIAISON PLANCHER-MUR

C'est l'appui qui assure la liaison du plancher à son support (murs et piliers) et la transmission des charges. On distingue 4 sources de désordres:

1 - POINCONNEMENT : l'appui est sous-dimensionné et ne répartit pas les charges de façon uniforme : tensions différentielles et fissures. Il faut augmenter la surface d'appui et ramener les charges au centre de gravité du mur. Les appuis qui affaiblissent la section du mur sont à éviter.
2 - ROTATION : le plancher prend de la flèche et subit une rotation sur son support : soulèvement, décentrement des charges, écrasement de l'arête intérieure, fissures. Il faut veiller au bon rapport charge/portée et installer un chaînage.
3 - VARIATIONS DIMENSIONNELLES : elles sont d'origine thermique ou proviennent d'un travail différentiel entre le plancher et son support. On évite le contact direct entre mur et plancher, en prévoyant une désolidarisation, un chaînage horizontal.
4 - DISCONTINUITE : une isolation thermique discontinue provoque la condensation.

MISE EN OEUVRE

Il faut prévoir des réservations de pose des planchers dans les murs, protéger contre la pluie ou réaliser les planchers après la couverture du bâtiment.

APPUI

La liaison entre le plancher et les murs de terre peut adopter différentes solutions où l'appui est soit indépendant du mur, soit sur le mur.

1 - APPUI INDEPENDANT DU MUR

1 - **SUR LES FONDATIONS** : des plots d'appui des poutres sont fixés sur l'empattement des semelles de fondations; convenable pour des planchers sur cave ou vide sanitaire mais quelques problèmes de fixation des plots. Avantage : pas de contrainte d'appui dans le mur de terre.

2 - **SUR LE SOUBASSEMENT** : celui-ci est élargi par rapport au mur pour recevoir les poutres. On prévoit une mise de niveau du soubassement et les poutres ne toucheront pas le mur. Pour économiser l'élargissement du soubassement, on peut poser les poutres dans des niches creusées à la base du mur, au niveau du soubassement. Là encore, les poutres ne touchent pas le mur. Dans les 2 solutions, on prévoit la pose d'une barrière anti-capillaire horizontale et une plinthe pour la finition. Pour un plancher en dalle B.A., on préfère un soubassement élargi car la pénétration de la dalle dans le mur affaiblit la base du mur.

3 - **A COTE DU MUR** : c'est le cas d'écoinçons en bois ou de poteau maçonnés en saillie du mur. Cette solution est préférable pour des planchers lourds et des murs de terre non porteurs : terre-paille en hourdage ou bauge peu portante p.e.

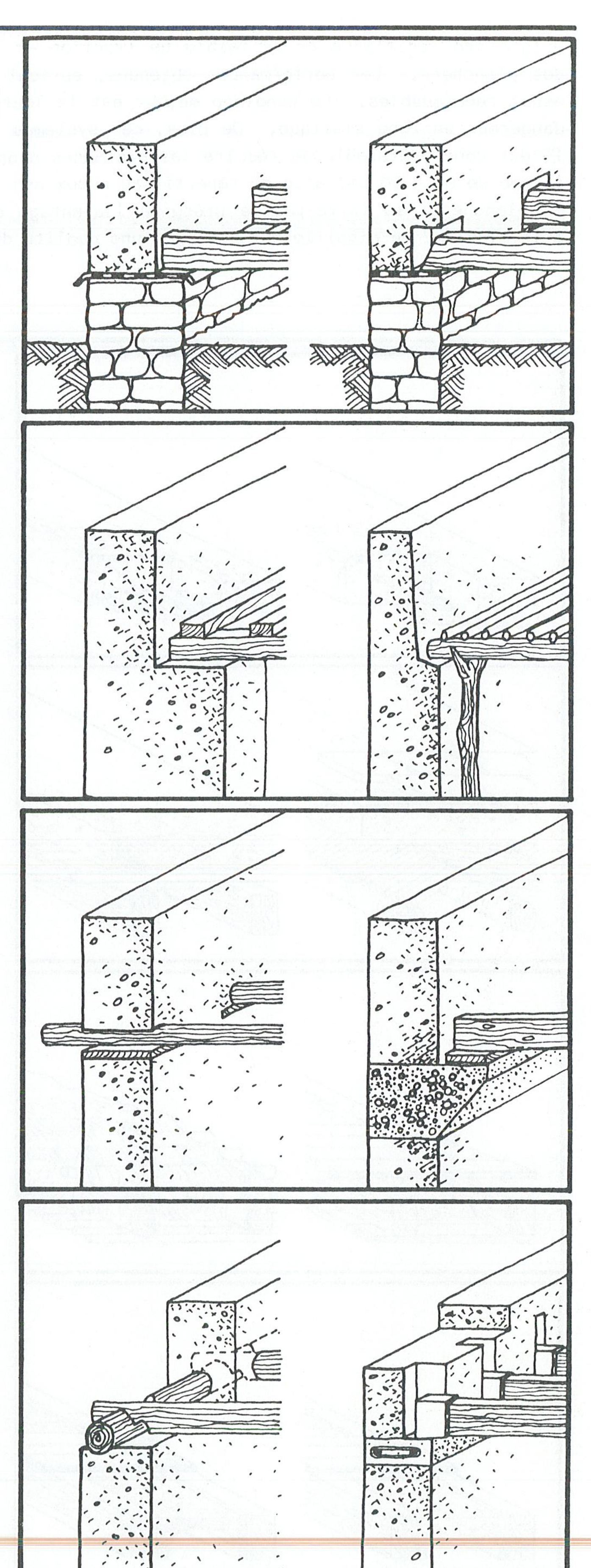
2 - APPUI DANS LE MUR

Il y a des risques d'affaiblissement ponctuel(poutres) ou continu (dalles) du mur, de rotation du support (trop grande liberté de mouvement des poutres ou flexion des planchers), de poussées différentielles sur le mur.

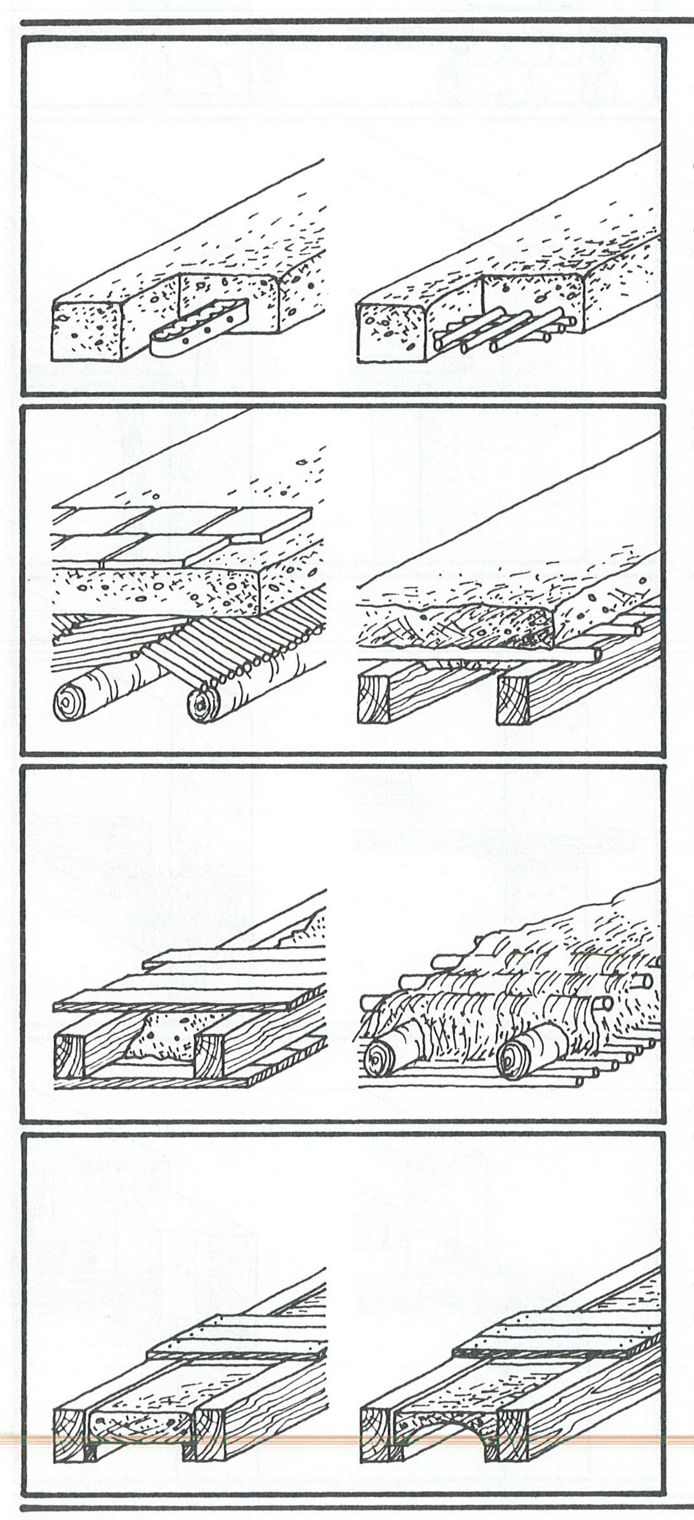
Les charges ponctuelles doivent être réparties sur une semelle en bois, en pierre ou en béton, bien dimensionnée (transmission des charges à 45°) ou sur un chaînage. On peut creuser les réservations de poutres ou les prévoir en élevant les murs. Pour les planchers en bois, on emploira des bois traités et on évitera le contact bois/terre: feutre bitumé ou mortier hydrofuge, matière souple.

3 - APPUI SUR LE COTE DU MUR

On réduit l'épaisseur du mur au passage de l'étage. Là aussi, il faut soigner les appuis ponctuels de poutre ou prévoir un chaînage. L'appui en corbeau ne convient que pour des briques comprimées stabilisées très résistantes à la compression et au cisaillement. Eviter la pose sur une poutre longeant le mur car il y a risque d'arrachement.



Malgré une résistance assez faible en traction et en flexion, la terre a été employée pour réaliser des planchers. Les performances obtenues, surtout lorsque le matériau est stabilisé et/ou armé sont assez remarquables. Le handicap majeur est la lourdeur des planchers en terre qui les rend notamment dangereux en zone sismique. De plus, ces systèmes induisent de fortes charges sur les murs porteurs. Il est donc préférable de réduire les distances d'appui des poutres de structure de planchers en terre (trame de 60 à 90 cm) afin de répartir au mieux ces charges sur les murs. Parmi les matériaux employés en planchers, la terre-paille présente l'avantage de sa légèreté, de sa résistance à la traction et à la flexion, au cisaillement ainsi qu'une qualité d'isolant thermique.



1 - STRUCTURE DU PLANCHER EN TERRE

1 - **DALLES EN BETON DE TERRE ARME** : les systèmes traditionnels de planchers en terre armée de bois ont fait l'objet d'études en vue de leur modernisation. Les recherches ont testé le bambou (USA) ou l'acier galvanisé (France, Sénégal). Les résultats sont peu satisfaisants car ces systèmes demeurent très lourds : 500 kg/m².

2 - SOL DU PLANCHER EN TERRE

2 - **STRUCTURE** : en bois, poutres recouvertes de planches, de rondins de bois ou même parfois de pierres plates. Des nattes tressées ou du papier fort, de la paille, s'interposent entre ce support et la terre, généralement damée (10 à 15 cm), pour éviter que la poussière ne tombe. Ces planchers pèsent jusqu'à 250 kg/m². Ceux qui sont recouverts de terre-paille bourrée sur des lattes espacées de 10 à 15 cm sont plus légers : 150 kg/m². La finition est soit une couche d'usure en terre-paille stabilisée, soit un enduit ou même un revêtement de sol. La sous-face est enduite à la chaux ou au plâtre et constitue un plafond de belle apparence.

3 - REMPLISSAGE EN TERRE

Ces systèmes sont souvent employés pour améliorer l'isolation acoustique.

3 - **TERRE EN VRAC** : de nombreux planchers à poutres et parquets en bois, avec sous-face en planches ou cannisse de roseaux, sont bourrés ou remplis de terre en vrac. La terre employée doit être parfaitement sèche.

4 - **PANNEAUX PREFABRIQUES** : ils sont le plus souvent réalisés en torchis ou en terre-paille et servent à remplir la sous-face du plancher sans participer à la portance du plancher. De ce fait, la trame des poutres peut être assez large - 80 à 90 cm - et les éléments peuvent être préfabriqués en courte ou grande longueur : 0,40 à 1,20 m, pour une épaisseur de 15 cm et pesant de 35 kg à 120 kg par élément. La forme en entrevous permet d'alléger le plancher.

4 - ENTREVOUS ET HOURDIS PORTEURS

5 - ENTREVOUS EN BRIQUES DE TERRE : les planchers à entrevous en briques font travailler la terre en compression, les efforts en flexion étant repris par des poutres ou poutrelles en bois, en acier (IPN) ou même en béton armé. La trame de pose des poutres varie de 0,50 m pour les plus petits systèmes, à 2 m pour les plus grands qui peuvent exiger l'emploi de tirants métalliques. Les entrevous en briques reposent sur les ailes inférieures (IPN) ou sur les reins (béton) des poutrelles. Une légère flèche (1/10 de la portée) permet une bonne reprise des efforts par les poutrelles. Ces systèmes restent assez lourds (400 kg/m²). Leur mise en oeuvre peut se faire avec coffrage, le plus souvent glissant, les briques étant posées sur leur chant ou à plat en 2 nappes avec décalage des joints ou sans coffrage : pose à la nubienne en inclinaison. On peut aussi employer des briques alvéolaires plus légères et des briques spéciales permettant un bon départ sur les poutrelles ou une mise en oeuvre sans coffrage par simple calage.

6 - ENTREVOUS COFFRES SUR PLACE : les entrevous en terre-paille avec flèche, mis en oeuvre sur un coffrage perdu en natte de roseaux très serrée constituent un plancher léger (150 kg/m²). Le roseau est un excellent support d'enduit de plafond. Les entrevous plats en terre-paille, renforcés par des rondins dans leur masse, sont plus lourds (220 kg/m²). Ces systèmes donnent une bonne isolation thermique et acoustique.

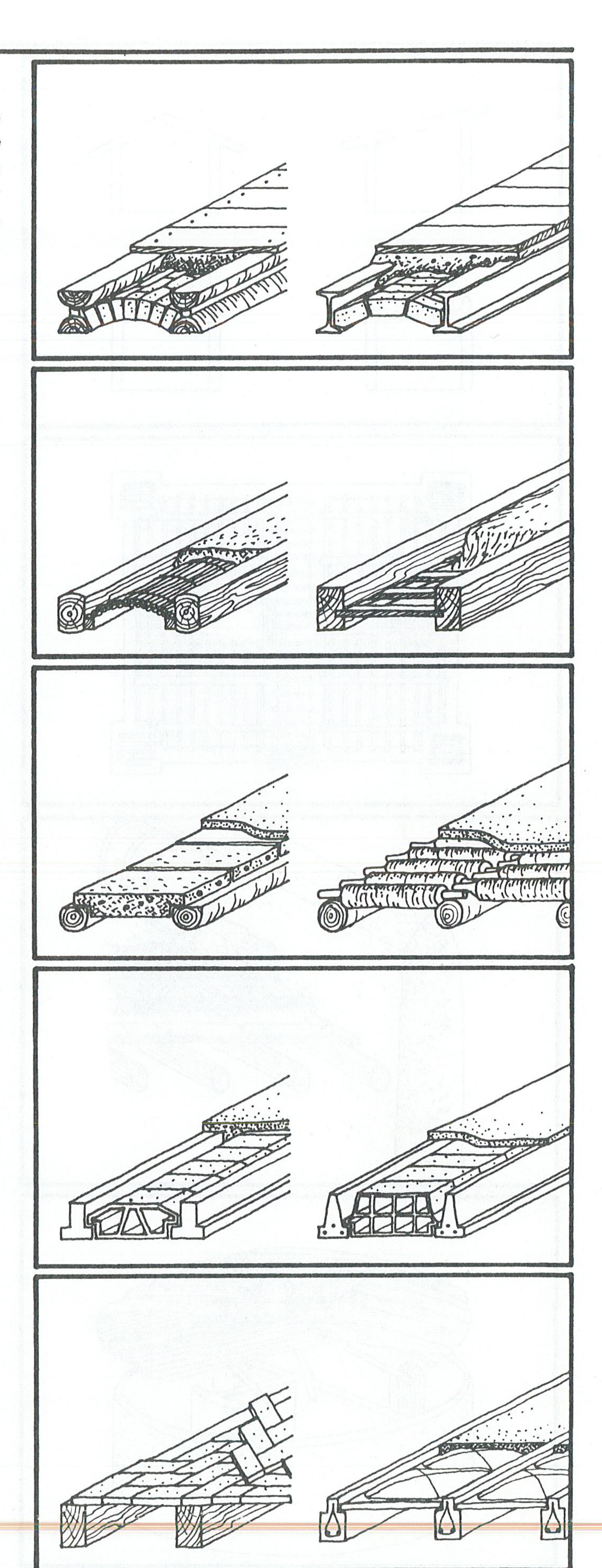
7 - HOURDIS PREFABRIQUES : l'élément porteur est toujours constitué de poutres ou poutrelles mais moins espacées (0,50 m). Les hourdis en terre-paille sont renforcés de 2 baguettes de bois pour résoudre les problèmes de flexion. Une dalle de répartition (6 à 10 cm) qui peut être armée d'un grillage, en béton ou même en terre stabilisée, solidarise poutres et hourdis. Une variante de ces hourdis est constituée par des fusées de terre paille. Ces systèmes sont légers(150 à 200 kg/m²).

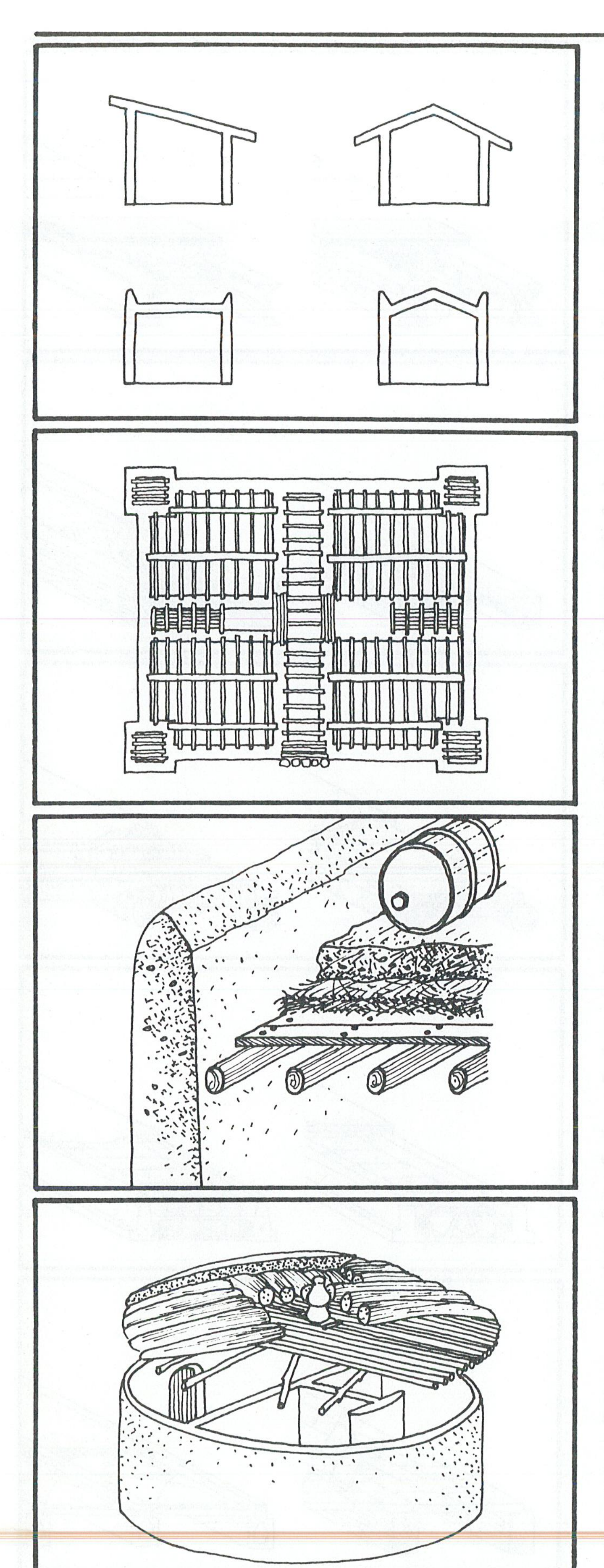
8 - HOURDIS ALVEOLAIRES : ces produits en terre comprimée stabilisée ou en terre extrudée, de conception classique, existent et sont testés au stade expérimental.

5 - AUTRES SYSTEMES

9 - HOURDIS HYPERBOLIQUES : en terre stabilisée, sur poutrelles en béton armé ont été testés au Pakistan. La charge peut atteindre 1 220 kg/m². Des recherches sont menées aux U.S.A. (Max-Pot).

10 - VOUTES SARRASINES PLATES : en briques minces hourdées au plâtre (2 nappes).





La toiture est le système le plus coûteux d'une construction, pouvant absorber jusqu'à 70 % du coût total. De plus, son exécution requiert une bonne qualification afin d'assurer la durabilité du système. Par définition, une toiture plate correspond à une pente maximale de 10°. Une pente de 1 à 2° suffit pour évacuer l'eau. Les toitures plates sont fréquentes dans les régions à climat chaud mais ne sont pas adaptées aux régions exposées aux cyclones : arrachement par succion. Généralement, les systèmes de planchers courants conviennent pour les toitures plates mais sont améliorés d'une étanchéité ou d'une protection de surface. Les systèmes qui emploient des bacs d'acier ou de fibrociment recouverts de terre ne sont pas conseillés du fait de la faible portance de ces supports et du fait de problèmes d'infiltration dans les recouvrements des supports. Les toitures plates en terre décrivent de très nombreux systèmes où la terre remplit différentes fonctions: revêtement, couche d'usure, étanchéité, forme de pente, chape de répartition, isolation et stockage thermique, etc ... La conception de ces toitures en terre dépend de l'exploitation du système : toiture non-accessible ou accessible.

POIDS

Les toitures plates en terre sont très lourdes : 300 kg/m² et jusqu'à 500 kg/m². Elles ne sont donc pas adaptées aux régions à risque sismique. Cette lourdeur induit des descentes de charges importantes dans les murs et demande une grande quantité de matériaux travaillant en flexion : poutres en bois, poutrelles en acier ou en béton. Les portées doivent être assez courtes, ce qui oblige à concevoir des plans adéquats. L'architecture yéménite ou marocaine décrit de nombreux exemples où cette contrainte du poids sur la conception des espaces est évidente : pièces en long.

EAU

Les toitures plates en terre y sont particulièrement sensibles. Des pluies diluviennes peuvent désintégrer la toiture. Il faut donc veiller à leur bonne étanchéité : terres spéciales (kaolins, terres salines), stabilisation, autres matériaux étanches et surtout, une conception appropriée et un entretien permanent.

FONCTIONNEMENT THERMIQUE

Du fait de leur grande inertie thermique, ces toitures sont adaptées aux climats chauds et secs. Si la toiture doit être isolée, on peut employer des nattes tendues, de la paille en vrac, en bottes, de la terre-paille, des algues marines. Un badigeon de chaux élève la réflexion solaire : 90 % contre 20 % à la terre non chaulée.

EVACUATION DE L'EAU

1 - **ETANCHEITE** : elle peut être réalisée avec des matériaux courants : feutre bitumé, feuilles de plastique p.e. ou en couches de terre argileuse damée, en terre stabilisée enduite: chape de chaux bien serrée p.e. Les étanchéités en feutre bitumé ou en plastique seront revêtues de terre pour ne pas être dégradées par le rayonnement ultraviolet. Veiller à ce que toutes les remontées de film étanche contre l'acrotère ou souches de cheminées, ventilation, soient bien soignées ainsi que les recouvrements de départ de gargouilles ou de descentes d'eau. Drainer les toitures et évacuer l'eau à l'opposé des vents dominants pour éviter les éclaboussures. Les étanchéités doivent être soigneusement entretenues.

2 - **CHENEAUX ET DESCENTES D'EAU** : il faut éviter de fixer les chéneaux contre les murs mais adopter la fixation en rive de toiture débordante.

Les sections doivent être larges et donner une bonne pente. Drainer l'eau par pan de toiture et évacuer en bout de chenal droit, jamais après un coude : risque de débordement, d'occlusion. Connecter immédiatement les chéneaux aux descentes.

Pour les descentes, choisir de larges sections et éviter de fixer contre le mur. Ne pas employer des matériaux fragiles ou périssables (plastique p.e.).

L'eau ne peut être rejetée au pied du mur : fourreau vers regard ou vers caniveau. Pas de récipient au pied du mur. Entretenir les descentes : réparations immédiates.

Les descentes incluses dans le mur sont à éviter, même en façade (saignées verticales). Eviter les descentes fantaisie : chaîne pendue p.e. (éclaboussures par jour de vent).

3 - **GARGOUILLES** : elles doivent être très soignées et avoir un large entonnoir au départ : risques d'engorgement ou d'occlusion. Large section, bonne pente, large débord du mur : 0,50 à 1 m.

Le recouvrement d'étanchéité au départ doit être très soigné et il faut prévoir un manchon étanche pour la traversée de l'acrotère : préférer une saignée dans l'acrotère.

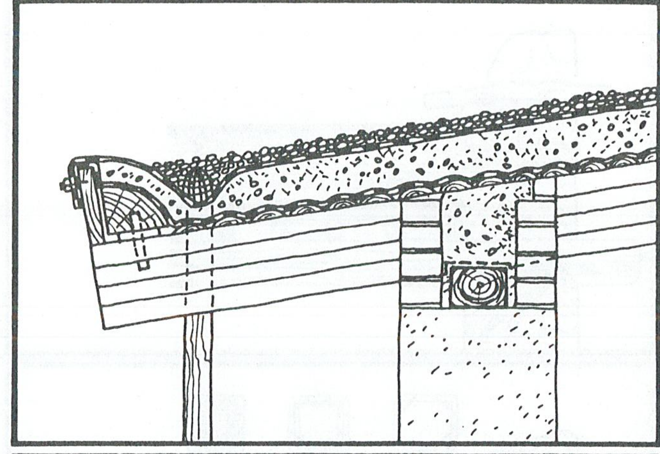
La gargouille doit être bien fixée et être impossible à desceller. La sortie de gargouille est protégée par enduissage.

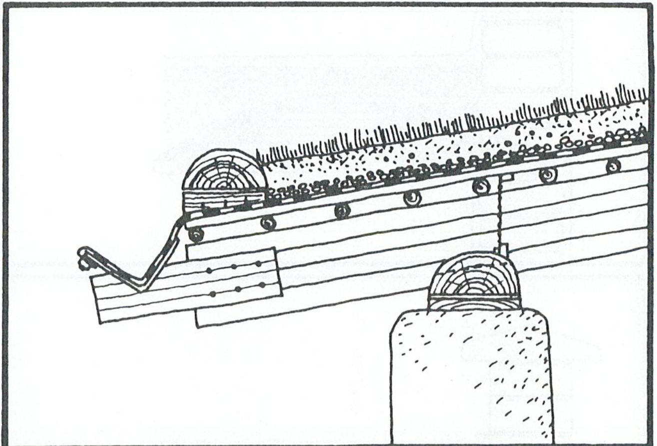
Les gargouilles sont orientées sous le vent.

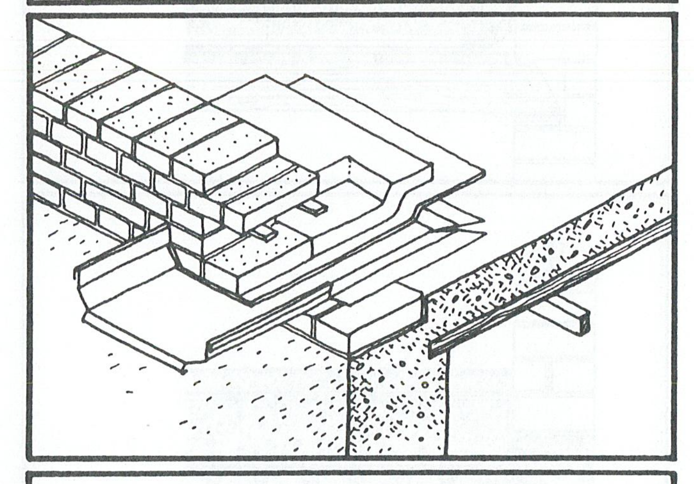
On emploie des matériaux de qualité : zinc, tôle galvanisée, terre cuite émaillée, bois creusé plutôt que des assemblages cloués, traiter le bois.

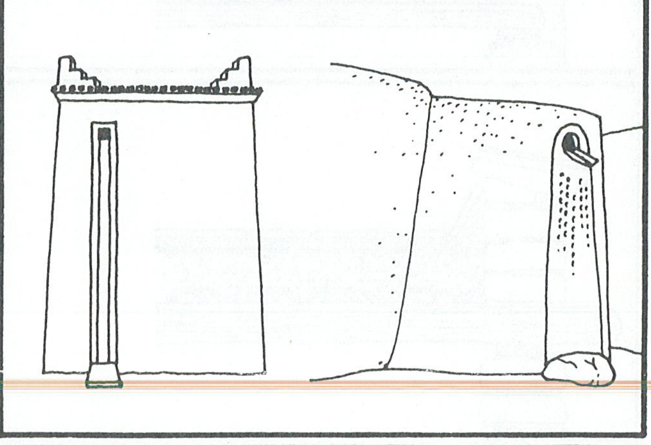
Les gargouilles ne doivent pas être prévues au-dessus d'un contrefort, d'une fenêtre ou d'une saillie.

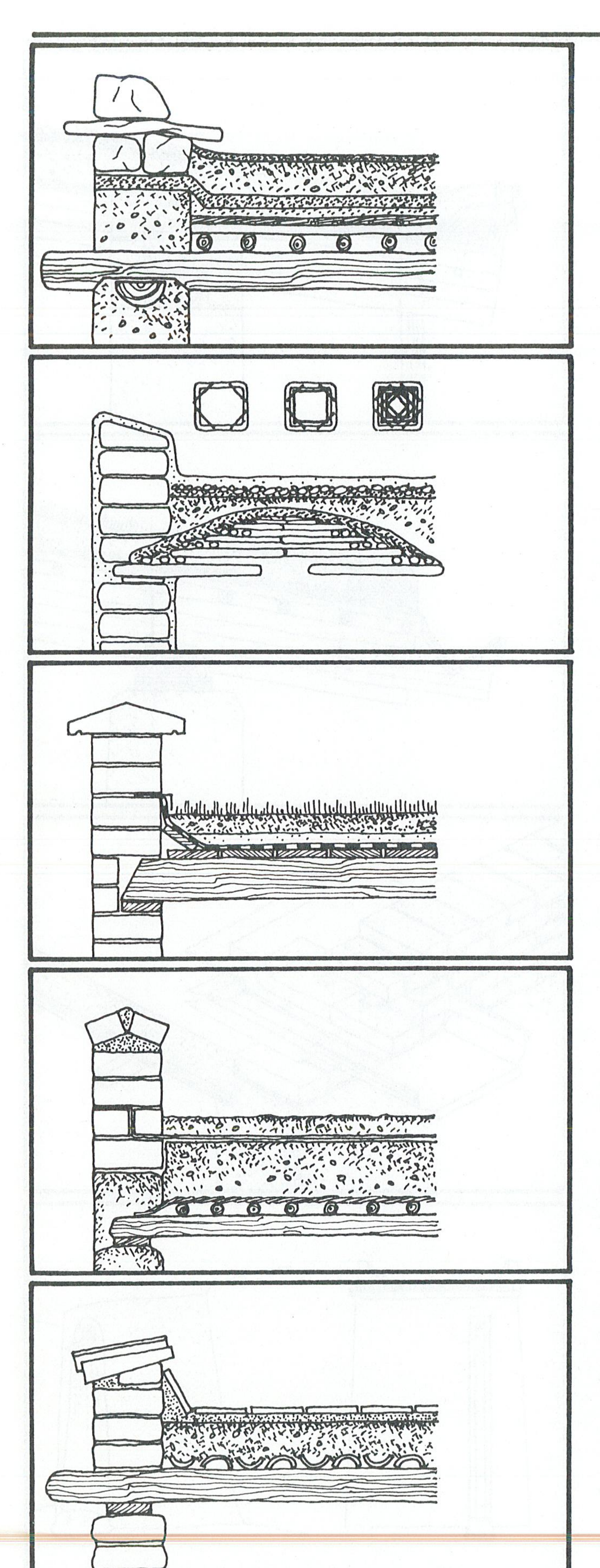
Le bas du mur est protégé contre les éclaboussures et l'eau est drainée vers un caniveau.











Le principal handicap des toitures plates en terre est leur étanchéité souvent défectueuse. Dans la construction traditionnelle, on emploie des terres spéciales : terre de termitière pulvérisée, boue d'argile salée (le "corak" de Turquie) ou des terres ajoutées de stabilisants naturels : beurre de karité p.e. On connaît aussi les systèmes qui alternent des couches de terre,de sable et d'argile en grosse épaisseur : ces toitures sont lourdes et leur étanchéité n'est garantie que si les couches supérieures parviennent à saturer. La qualité d'une toiture en terre dépend avant tout d'une bonne mise en oeuvre : damer la terre en plusieurs couches et bien obturer toutes les fissures de retrait. La couche superficielle peut être ajoutée de cailloux. Elle forme une bonne couche d'usure résistante à l'érosion d'impact des pluies.

1 - COUCHES DE TERRE

Si ces terres sont traitées ou stabilisées, il faut employer des produits efficaces. On connaît l'exemple désastreux de l'huile de vidange p.e. Préférer une stabilisation au bitume qui est plus efficace pour ce type d'ouvrage que la chaux ou le ciment. On peut aussi ajouter des fibres (déchets de canne à sucre, herbe sèche, balle de riz) jusqu'à 60 % en volume pour la couche d'isolation. Un entretien périodique s'impose.

2 - ENDUITS

Une chape de chaux et gros sable, bien serrée et dont les microfissures sont obturées par un badigeon, régulièrement entretenue, est efficace. On peut aussi employer des peintures à base de caoutchouc mais attention à la condensation au-dessus de pièces humides ou mal ventilées.

3 - FEUTRE BITUME

Il peut être placé sous la terre damée que l'on recouvre de cailloux et de mousse plantée. Il peut être aussi placé sur la terre damée mais protégé de la chaleur par du gravier. Les raccords avec l'acrotère et collecteurs d'eau doivent être très soignés.

4 - FEUILLE DE PLASTIQUE

Une feuille de polyéthylène placée sous la terre est aussi efficace qu'un feutre bitumé. La terre peut être plantée de gazon à racines non pénétrantes. Soigner les raccords entre la toiture et les murs.

5 - PAVEMENTS,CARREAUX,DALLETTES

Les toitures accessibles peuvent être revêtues de pavements de toutes sortes. Donner une bonne pente et bien drainer vers les gargouilles et descentes. Employer un mortier hydrofuge. Soigner les raccords relevés.

EFFETS DU VENT ET DE LA PLUIE

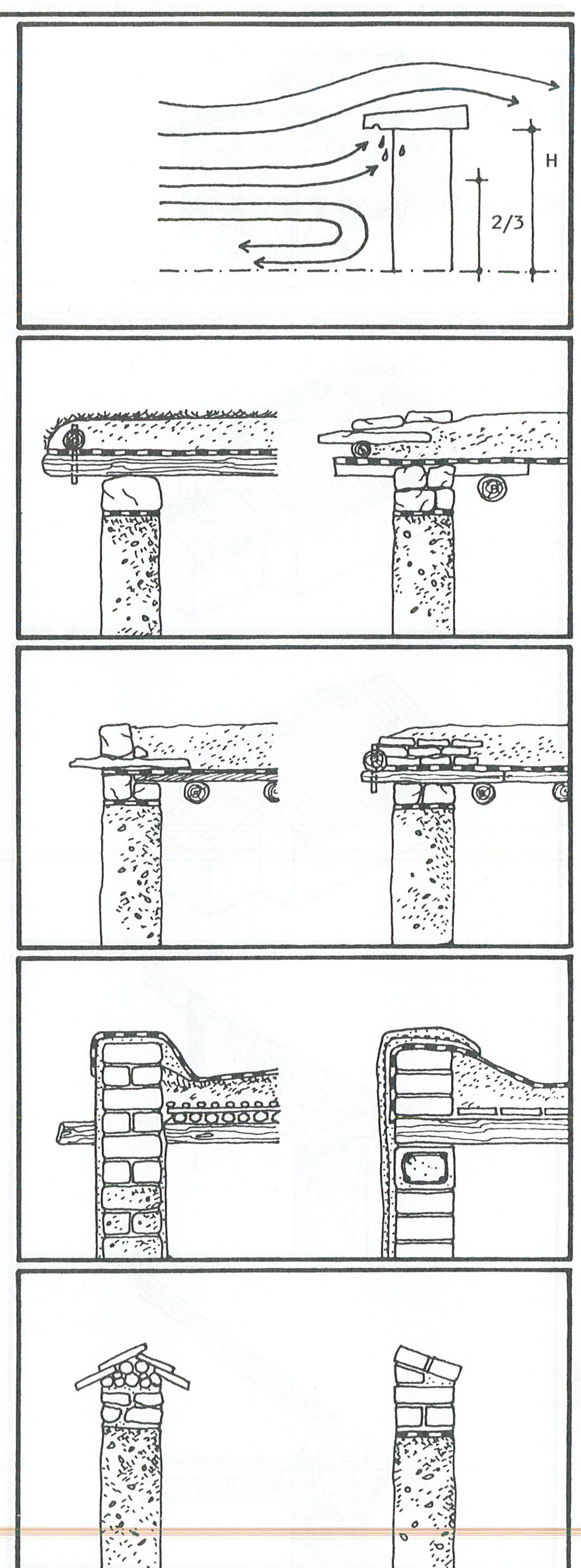
Sur les façades exposées au vent dominant, on peut observer une division du flux d'air au niveau de 2/3 de la hauteur du bâtiment. Le flux d'air se divise en deux, adopte une direction ascendante et une direction descendante avec des effets tourbillonnaires au nu de la façade, d'autant plus sensibles si des obstacles tels que corniches, saillies, auvents, débords de toiture s'y opposent. Des études faites par le B.R.E. (Angleterre) ont montré que la taille des saillies agit directement sur l'importance de l'érosion due à l'action combinée du vent et de la pluie. En effet, si les saillies protègent des pluies verticales, elles favorisent aussi le ruissellement contre la façade et les infiltrations, notamment au niveau des parties de murs qu'elles recouvrent, sur une hauteur d'au moins 20 cm. Cela est d'autant plus sensible si la saillie est petite (5 à 20 cm) et plus haute sur la façade : notamment le débord de toiture. Il est préférable que la saillie soit plus large (au moins 30 cm) afin de limiter l'érosion. Il est aussi indispensable de prévoir un enduit sur et sous ces saillies sur une hauteur minimale de 20 cm.

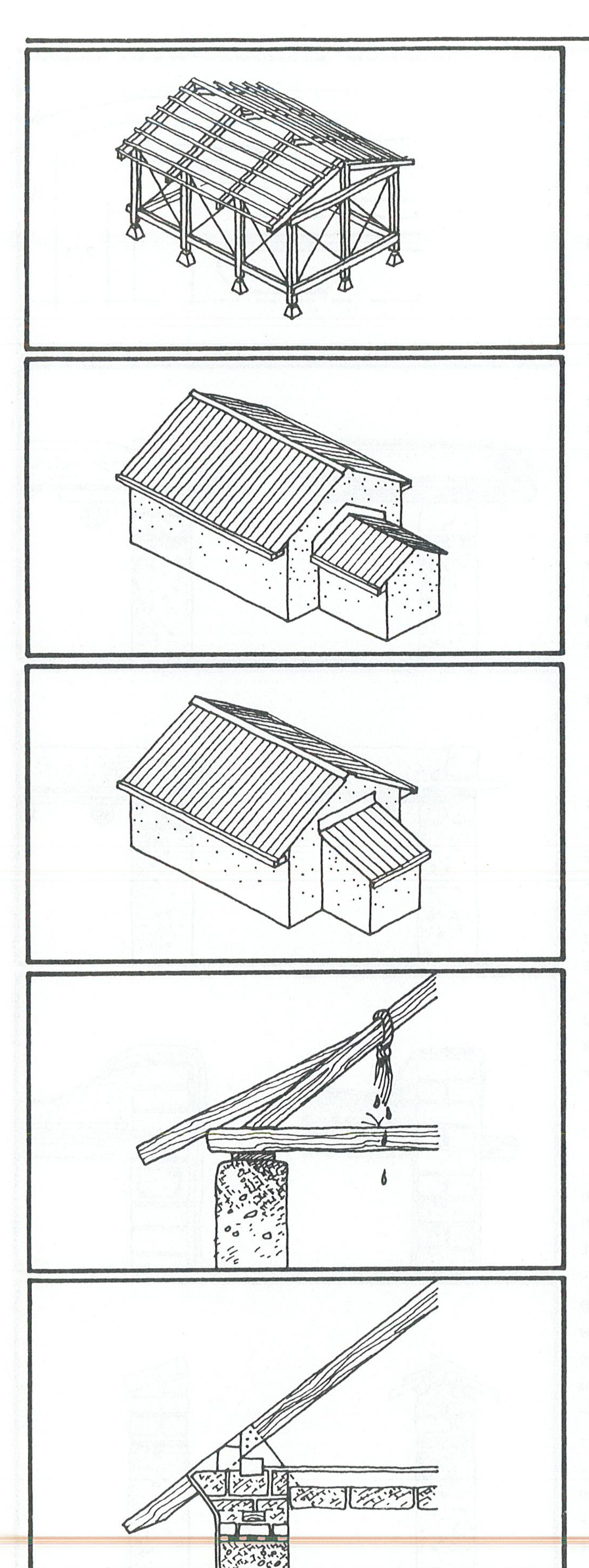
DEPASSEE DE TOITURE

La fonction d'une dépassée de toiture est diverse: retenir la terre en toiture, réduire l'érosion du haut du mur, rejeter l'eau à l'écart de la base du mur, protéger la façade contre les pluies verticales, faire ombrage. Beaucoup d'architectures traditionnelles en terre adoptent un large débord de toit (min. 30 cm). Les rives des dépassées de toitures plates peuvent être alourdies : meilleures stabilité et résistance à la succion du vent; ces rives peuvent être équipées de chéneaux largement dimensionnées (risque d'occlusion par la terre du toit) et bien fixés.

ACROTERES

L'acrotère permet de retenir la terre en toiture et de mieux contrôler l'évacuation de l'eau en la dirigeant à souhait vers les gargouilles et descentes. C'est aussi un garde-fou pour les terrasses accessibles, une protection efficace contre la force de succion des vents. L'acrotère joue aussi un rôle esthétique. L'acrotère doit être lourd et construit en matériaux durables et/ou protégés de l'érosion, soit par un chapeau débordant (30 cm min.) construit en matériaux classiques (pierres, briques, tuiles, roseaux et terre), soit par un enduit, de préférence, imperméable et armé. Les remontées de barrières étanches contre l'acrotère et au droit des gargouilles devront être très soignées.





Les toitures inclinées débordantes (min. 30 cm) sont très efficaces pour évacuer l'eau de pluie et sont donc particulièrement adaptées aux constructions en terre. Ces toitures sont également adaptées aux régions à risque de cyclone (30° de pente minimum), notamment les toitures à 4 pans qui sont préférables, pour ces régions, aux toitures à 2 pans. Les 4 pans protègent mieux contre le vent et la pluie, économisent le matériau de mur mais compliquent la construction. Ces toitures élaborées coûtent cher en matériaux et en main-d'oeuvre aussi n'est-il pas rare de constater une diminution des pentes : réduction de surface et économie de matériaux de charpente et de couverture. Les toitures à 4 pans ou à 2 pans permettent de réaliser des structures "parapluie" et "parasol" que l'on dresse avant l'élévation des murs, offrant la possibilité d'un travail à l'abri. Ce principe supprime les contraintes de charge et de poussée sur les murs de terre car l'ouvrage de la toiture se fait sur les fondations et dalles. Il y a toutefois une redondance de structure et de matériaux qui n'est acceptable que pour des économies aisées ou pour d'importants programmes de construction.

EAU

La toiture doit être rapidement installée et sans interruption trop longue de l'ouvrage. S'il pleut pendant la construction du toit, le haut des murs non couverts doit être bien protégé. Il faut toujours prévoir une défaillance de la toiture et installer une étanchéité sur le haut des murs. A chaque matériau de couverture correspond une pente. Diminuer cette pente peut occasionner des fuites à cause d'un drainage insuffisant, d'une stagnation et d'une infiltration de l'eau. Il faut éviter les toitures en sheds ou à 2 pans adjacents en rives basses ou prévoir de très larges chéneaux pentus. Soigner les raccords d'étanchéité. Les murs passants en pignons sont à éviter car ils obligent à réaliser des solins dont l'efficacité n'est pas toujours garantie. Les solins des toitures appuyées sur les murs- pignons sont à soigner par une bande d'enduit ou surface d'usure en pierres, briques cuites, contre le rejaillissement.

CHARGES ET POUSSEES

Il faut supprimer ou bien reprendre les poussées horizontales : risque de flambement des murs ou de fissures au voisinage des baies. Répartir uniformément les charges sur des chaînages : en murs gouttereaux pour toits à 2 pans, en tous murs pour toits à 4 pans. Renforcer les pignons des constructions à murs minces : armatures, chaînages, poteaux. Ancrer les toitures aux chaînages.

ANCRAGE DES TOITURES INCLINEES

L'ancrage des toitures aux murs est indispensable pour réduire le risque de déformation de la toiture et de soulèvement sous la pression des vents forts. Cette disposition est impérative pour les régions exposées au risque de cyclones. En règle générale, les solutions d'ancrage doivent être très solides et correctement dimensionnées : ne pas économiser le matériau. Les toitures doivent être accrochées aux murs de façade, gouttereaux et pignons, mais peuvent également être ancrées aux murs de refend. Lorsque la structure du bâtiment est renforcée de poteaux en béton ou en bois, les problèmes d'ancrage se résolvent assez bien. Il est toutefois préférable d'ancrer les toitures sur des chaînages continus plutôt que sur des appuis isolés.

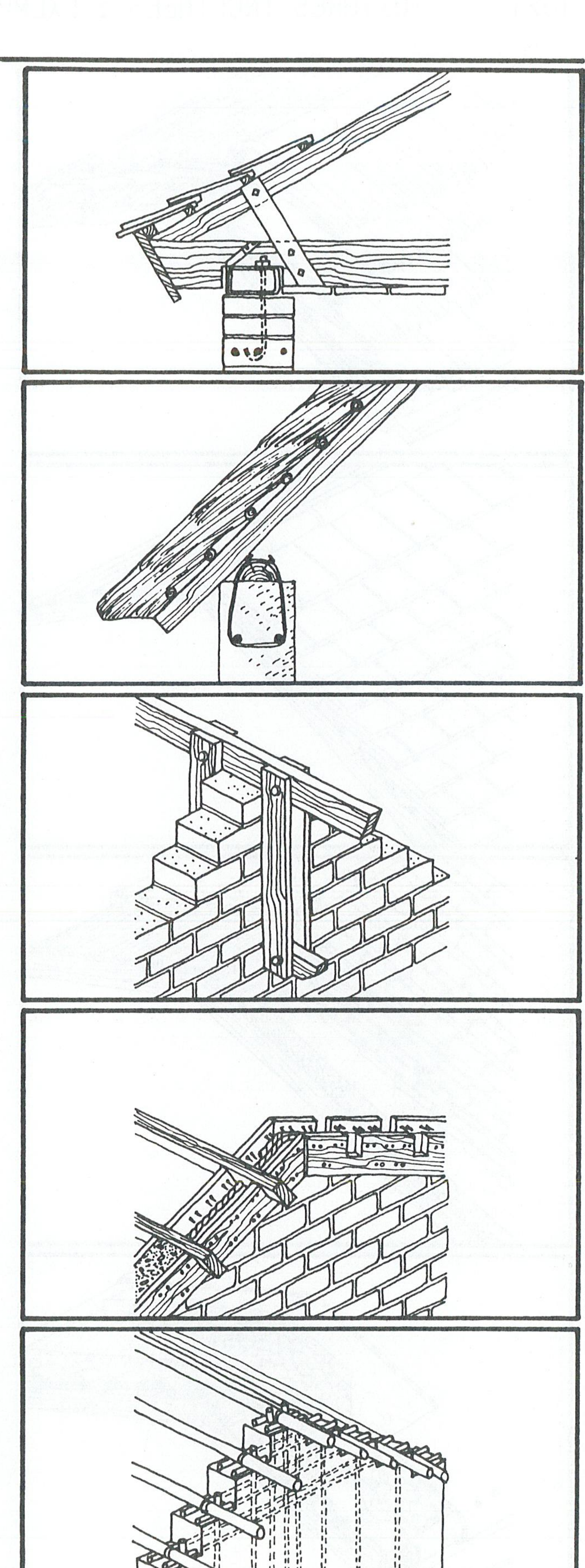
1 - ANCRAGE EN MURS GOUTTEREAUX

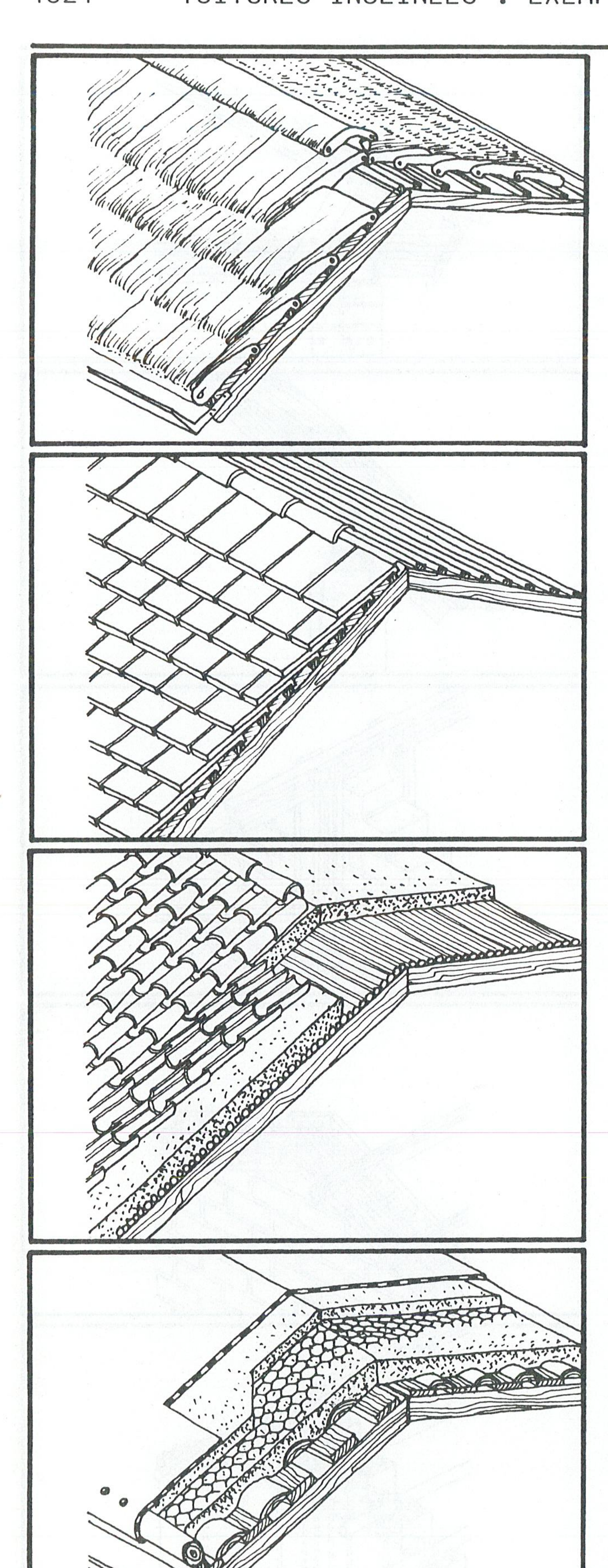
1 - EN BOIS : une poutre en bois qui couronne le mur gouttereau peut aussi faire office de chaînage tout en permettant l'ancrage des entraits de charpente ou tout simplement d'une panne sablière. Cet appui continu en bois doit être parfaitement solidarisé au mur : colliers, fers boulonnés scellés au mur p.e. Lorsque le chaînage est plus bas que la cote définitive d'arrasement sous toiture du mur gouttereau, la panne sablière peut être accrochée à ce chaînage par des systèmes de clefs ou de tirants métalliques ou en bois. Ce même chaînage peut permettre l'ancrage de corbeaux ou de pattes en métal qui reçoivent une poutre en façade pour appuyer un auvent ou une véranda, ou même une extension future de la maison, en façade (Inde).

2 - EN BETON : un chaînage béton permet de sceller des fers en attente qui reprendront une panne sablière ou une poutre d'appui de la toiture.

2 - ANCRAGE EN MURS-PIGNONS

Les toits à 4 pans sont également ancrés aux murs-pignons suivant les principes déjà évoqués. Pour les toits à 2 pans dont les pannes sont débordantes en murs-pignons, on peut prévoir un ancrage de ces pannes au chaînage qui prolonge celui des murs gouttereaux ou à des chaînages intermédiaires à hauteur d'appui des pannes. On peut aussi adopter une solution de tirants en métal ou en bois allant reprendre des corbeaux en bois fixés à hauteur du chaînage, soit dessus celui-ci (le poids repose sur le chaînage) soit dessous celui-ci (la traction en cas de vent s'exerce sur le chaînage). Les solutions d'ancrage sur chaînage, en pignon, évitent de trop charger ce mur qui est le plus faible de la construction. Les systèmes de clefs ou de tirants en bois ou en métal, contribuent à raidir le pignon.





1 - BARDEAUX DE TERRE-PAILLE

Ce bardeau est composé d'une couche de paille - visible en toiture - prise en 2 couches d'argile dont la 2° est visible en sous-face. L'argile est protégée de la pluie par la paille qui est protégée du feu par l'argile. La fabrication des bardeaux est aisée et économique. Les dimensions varient de 90 cm à 1,20 m en longueur et de 45 cm à 1,50 m en largeur mais 60 cm de large facilite la mise en oeuvre.
Le poids moyen de cette couverture épaisse de 20 cm est de 50 kg/m².

2 - TUILES

Il existe des tuiles mécaniques plates (Brésil) et des tuiles-canal (France) en terre argileuse fortement stabilisée. Ces matériaux restent gélifs sauf s'ils sont sur-stabilisés n'étant plus alors réellement économiques.
Des tuiles réalisées avec de la résine phénolique sont restées au stade de la recherche.

3 - MORTIER DE POSE

On utilise dans certains pays (Tibet p.e.) des terres très argileuses en guise de mortier, pour fixer des ardoises ou même des lauzes. Ce mortier qui est étanche (saturation de l'argile) peut être aussi employé pour fixer des tuiles-canal ou romaines (Burundi p.e.).

4 - COUCHES DE TERRE

Les systèmes sont similaires à ceux employés pour les toitures plates : terre damée ou terre-paille. Une étanchéité en feutre bitumé est directement posée sur la terre ou sur un voligeage en bois recouvrant la terre. Il existe aussi des toitures en terre argileuse stabilisée au bitume et armée d'un grillage (chape ou bardeaux). Ces toitures sont lourdes.

5 - TOITURES PLANTEES DE GAZON

Ces toitures offrent plusieurs avantages : purification de l'air intérieur, stockage et isolation thermique,régulation du confort par les phénomènes de condensation, d'évaporation, amortissement acoustique. L'épaisseur de terre gazonnée qui est d'au moins 20 cm induit une lourde charge (forte absorption d'eau) qui oblige à concevoir une charpente adaptée. Il importe avant tout de prêter attention à la qualité de l'étanchéité. Dans les systèmes traditionnels, on employait du bois traité ou des pierres plates revêtus de bitume. Il existe aujourd'hui des étanchéités à base de plastique armé que l'on pose en une seule pièce

sans raccord. Ce type d'étanchéité doit être ininflammable et résistant au rayonnement solaire. La pente de ce type de toiture est de 5° à 45° avec une préférence pour un angle de 20° qui permet un bon drainage.

6 - FUSEAUX DE TERRE

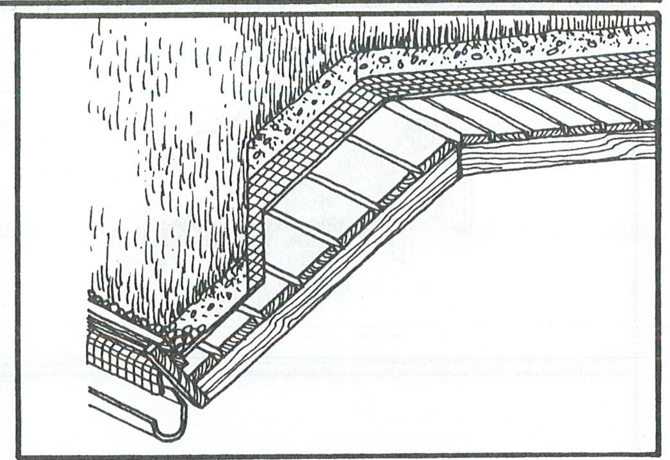
Il s'agit de terre argileuse mêlée de fibres longues et enroulée autour de bâtons en forme de fuseaux. Ces fuseaux sont appuyés sur les pannes de charpente à leur état humide et pressés les uns contre les autres. Les interstices entre les rangs de fuseaux sont bourrés de torchis. Après séchage des fuseaux, les fissures sont rebouchées avec de l'argile passée au balai. Une couche de 2 cm de mortier de terre stabilisée avec des fibres finement hachées et de la chaux est ensuite appliquée puis revêtue de papier goudronné que l'on peut sabler. Ce type de toiture pèse environ 200 kg/m² (y compris la charpente qui est assez légère). L'emploi de ce système de toiture pour les régions infestées de termites n'est pas recommandé.

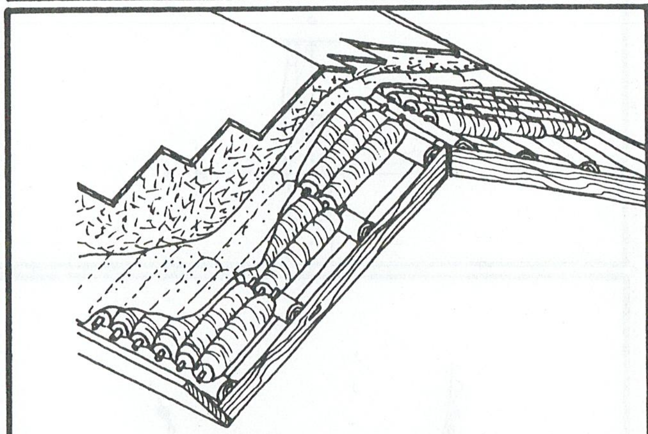
7 - DALLETTES

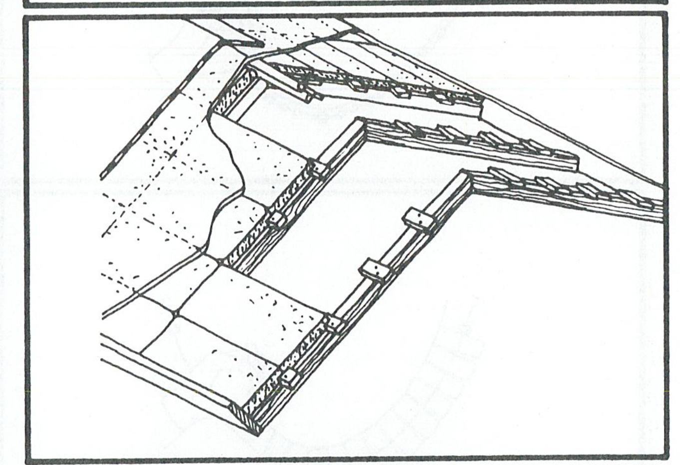
Ces éléments assez minces en terre-paille ou torchis, armés de baguettes de bois sont posés sur un simple chevronnage. Elles ont une faible portance. Les dallettes sont retenues en rive basse par une planche qui reprend l'épaisseur de la toiture finie, de même en rives rempantes. Le faîtage reçoit des baguettes couvre-joints et une couche de terre-paille. Une chape de mortier de terre mêlée de fibres hachées et stabilisé à la chaux précède la pose d'un feutre bitumé.

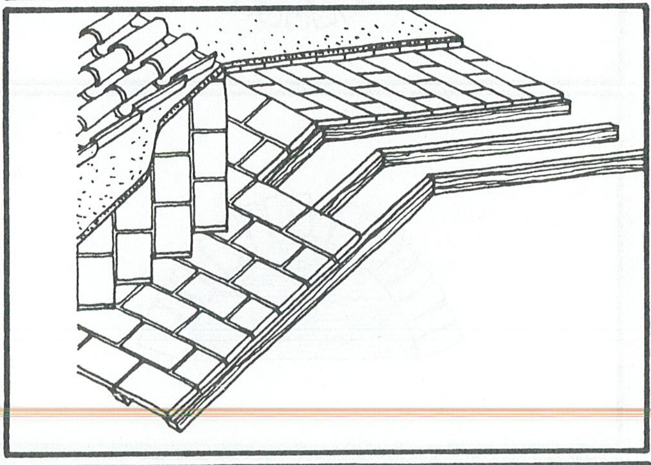
8 - TOITURES EN BRIQUES

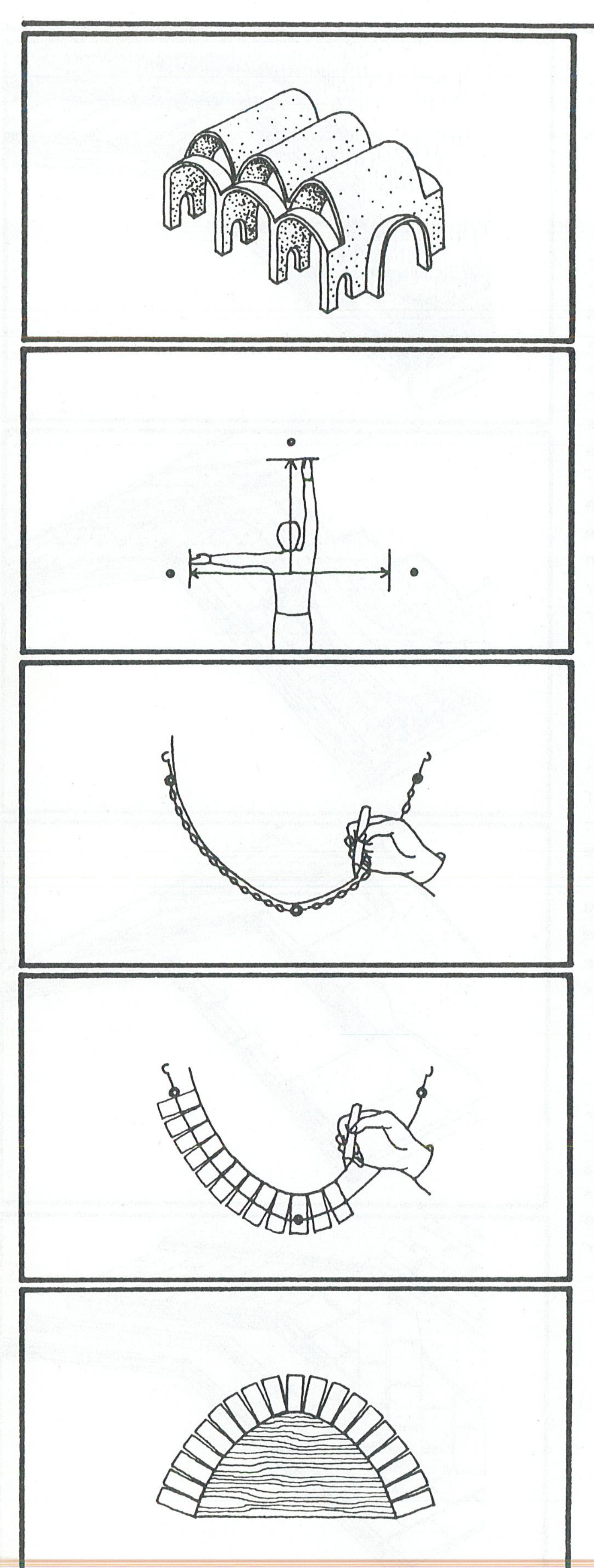
C'est le principe de la voûte sarrasine plate réalisée en petites briques plates hourdées au plâtre. Les briques doivent être de qualité et la main d'oeuvre qualifiée. Le système consiste en 2 couches de briques, la 1ère étant revêtue d'une couche de plâtre et la 2ème d'une chape de mortier de ciment et de sable. Des tuiles callées au mortier recouvrent la toiture.











Pour couvrir les espaces, dans de nombreuses contrées où le bon bois de structure fait défaut, les constructeurs imaginèrent la voûte. Très tôt développée en Egypte et construite en briques de terre crue (greniers du Ramesseum p.e., 8 000 ans av. J.C.), la voûte allait s'imposer dans la plupart des pays du Moyen-Orient et du Proche-Orient, au fil des siècles. Cette forme de toiture en terre y marque encore le paysage architectural de nombreuses cités. Construite en terre, la voûte offre l'avantage d'exploiter les bonnes aptitudes de travail en compression du matériau et de bien diriger les charges de toiture dans les murs verticaux.

DOMAINES D'APPLICATION

Un grand espace peut être couvert par une seule voûte continue ou par une succession de petites voûtes transversales. Ces deux systèmes très communs sont associés à des formes de voûtes diverses. L'emploi de la voûte pose parfois quelques problèmes d'acceptation culturelle, d'inadaptation aux régions très pluvieuses, ou de comportement face aux séismes. Mais ces problèmes trouvent des solutions adaptées.

FORMES

Elles sont multiples : voûtes, covoïdes, voûtes d'arêtes, en arc de cloître, voûtes d'ogive ou nervurées mais, la voûte la plus courante est le berceau dont les formes sont multiples : berceau plein cintre, continu, en anse de panier, transversal, en rouleaux, brisé ou incliné, hélicoïdal plein cintre (escaliers p.e.), tournant. La voûte caténaire est une autre forme très pratiquée en Nubie (d'où le nom de voûte nubienne) et rendue célèbre par les travaux de Hassan Fathy. Toutes ces formes de voûtes existent en forme pleine, surbaissée ou surhaussée.

TRACAGE

Des méthodes de calcul sont applicables. Mais, p.e., pour la voûte caténaire, le traçage par la chaînette est plus pratique. La portée et la flèche sont prédéterminées par 3 points que l'on positionne sur un plan vertical et par où passe la chaînette. La courbe tracée qui sera renversée, reste dans le 1/3 moyen de la voûte. La forme du coffrage sera compensée par la juste épaisseur de la voûte : 1/2 épaisseur de part et d'autre du tracé.

DIMENSIONNEMENT

1 - **PORTEE** : des voûtes en blocs comprimés stabilisés ont atteint les 6 m de portée, pour 15 cm d'épaisseur alors que les voûtes en pisé dépassent rarement les 2,5 m de portée. En Iran, la portée la plus courante est de 4 m, ce qui est le maximum pour les zones à risque sismique où l'on fixe également le rapport de portée à longueur à 1,5 largeur. Au-delà de ce rapport, la voûte risque d'entrer en résonnance et de se briser (d'après des recherches de l'Université de Baja California, Mexique).

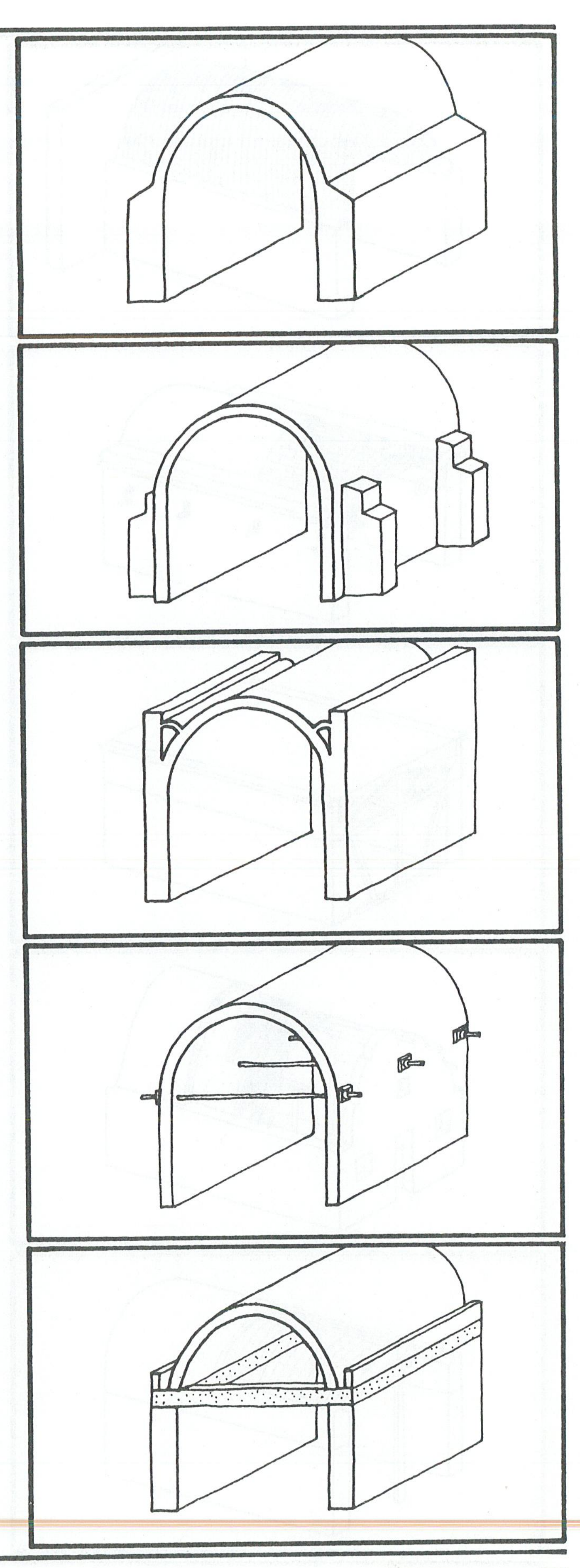
2 - **FLECHE** : plus la flèche est basse plus les poussées latérales sont fortes, plus la flèche est haute plus les poussées sont faibles, voire nulles. Pour la voûte caténaire, le rapport de portée et de flèche classique précise que la flèche est égale à la moitié de la portée augmentée de 50 cm. En zones sismiques, il est conseillé de limiter la flèche entre 20% à 30% de la portée.

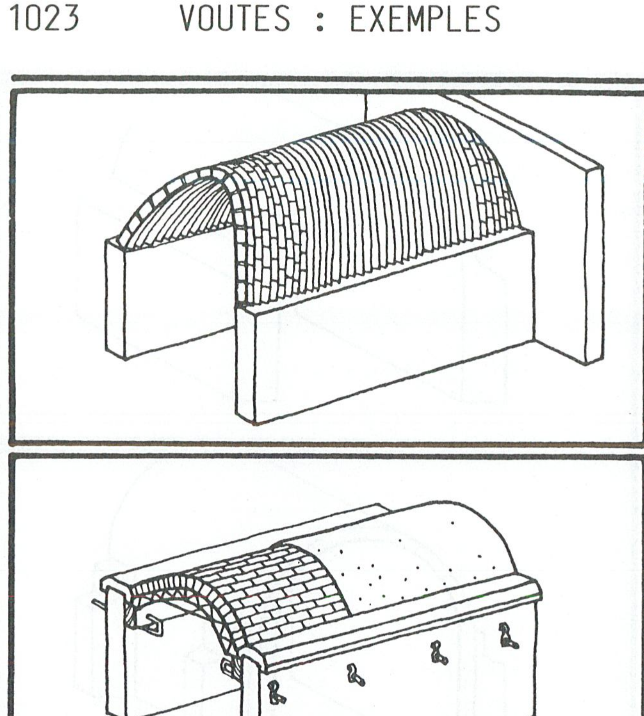
3 - **POUSSEES** : elles peuvent être très fortes sur les murs pour des flèches importantes, jusqu'à causer leur effondrement. Les méthodes appliquées pour le dimensionnement des arcs et des pieds-droits peuvent être appliquées pour dimensionner les murs. Il convient surtout de bien soigner la base des murs et leurs fondations. Plusieurs solutions assurent une bonne stabilité aux voûtes.

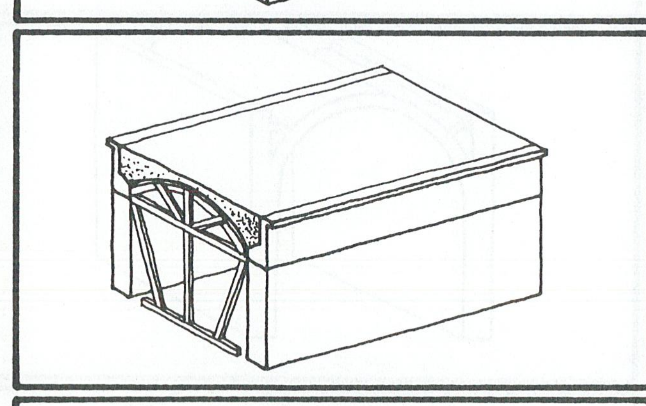
- Des murs épais : ceux-ci emploient beaucoup de matériau et ne doivent pas être affaiblis par de grandes baies.
- Des contreforts qui doivent s'appuyer sur de bonnes fondations solidaires de celles des murs.
- Une charge de précompression (acrotère ou pinacle) qui rétablit la verticalité des poussées.
- Des tirants qui annulent les poussées : les répartir uniformément et bien les ancrer.
- Un chaînage qui reprend les poussées et qui doit résister aux forces de flexion induites par les poussées.

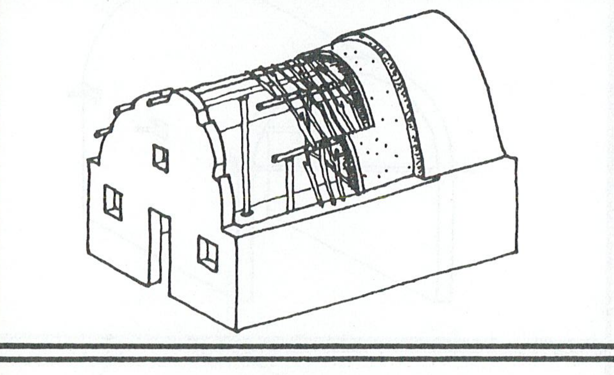
ETANCHEITE

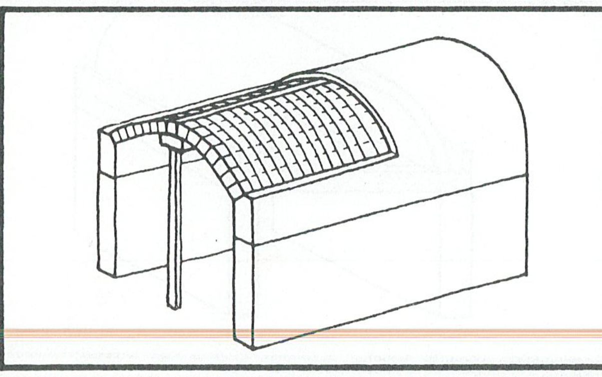
C'est le problème majeur des voûtes en régions pluvieuses : infiltrations par les microfissures de surface (du fait de dilatations aux cycles répétés de chaleur et de froid),drainage insuffisant à la clef et aux reins (l'eau stagne et imbibe le matériau : il faut accentuer la pente). Les voûtes doivent être protégées avec soin des pluies par des enduits étanches, feutres bitumés, peintures élastiques et par un entretien régulier.











SYSTEMES CONSTRUCTIFS

1 - EN BRIQUES, SANS COFFRAGE

C'est la mise en oeuvre "à la nubienne" qui exploite la friction des briques entre elles et l'adhérence du mortier de terre, avec une inclinaison des assises de 10 à 15°. Les briques doivent être légères : adobes riches en paille p.e. et peu épaisses - 5 à 6 cm. On peut aussi employer des blocs comprimés peu épais et à griffes pour améliorer leur adhérence. La principale difficulté est le respect de la courbure (rester dans le 1/3 moyen) et de la hauteur de la flèche. Un gabarit de mise en oeuvre est nécessaire pour des constructeurs non expérimentés.

2 - EN BRIQUES, AVEC COFFRAGE

Le coffrage permet de travailler dans un sens parallèle aux murs. Il peut être lourd et intégral ou léger et glissant. Dans ce dernier cas, on avance par tranches successives de briques appareillées ou même en rouleaux. L'appareillage de la clef de voûte doit être soigné. On veillera à bien soutenir le coffrage (encorbellement au niveau des sommiers ou bastaings temporairement étayés permettant un calage du coffrage avec des coins en bois).

3 - EN PISE, SUR COFFRAGE

Ce système constructif existe, bien que peu employé. Les voûtes monolithiques en pisé sur coffrage sont généralement surbaissées et maintenues par des tirants. Une forme de pente est rapportée sur l'extrados. Le coffrage est très lourd et intégral (vibrations du damage), nécessairement immobilisé pendant plusieurs jours.

4 - EN BOUE, SUR CHARPENTE

C'est p.e. la technique des Masai, au Kenya. Une structure voûtée en branches entrelacées est ensuite couverte d'une boue de terre ajoutée d'excrément de vache. La rigidité et l'étanchéité de ce système sont précaires.

5 - EN ELEMENTS PREFABRIQUES

Ce système s'inspire de celui utilisé pour la construction de l'Université de Bujumbura au Burundi. Des éléments creux sont préfabriqués par des presses hydrauliques à double compression. Le système est très sophistiqué et exige l'emploi de fers à béton pour assurer une bonne stabilité de la voûte préfabriquée qui est mise en oeuvre en demi-voûtelettes accolées sur un cintre.

MISE EN OEUVRE DES VOUTES EN BRIQUES, SANS COFFRAGE

1 - DEMARRAGE DE LA VOUTE

Deux systèmes d'appui du départ de la voûte sont possibles.

- Contre un appui vertical : un mur-pignon passant sur lequel s'inscrit la totalité de la courbure de la voûte. Ce mur d'appui doit être lourd et parfaitement stable, sans malfaçons d'appareil qui pourraient occasionner des fissures sous la pression de la voûte.
- Contre un appui horizontal : la voûte s'appuie sur les dernières assises des murs-pignons et démarre comme une coupole. Les assises sont progressivement redressées jusqu'à l'inclinaison à 15°. La liaison des murs-pignons et gouttereaux dessine une configuration qui peut être rectangulaire, triangulaire, 1/2 hexagonale ou même arrondie. L'arrondie est recommandée pour les zones sismiques car la voûte se comporte comme une monocoque. Les voûtes appuyées contre un mur-pignon vertical risquent de casser à cause d'une amplitude de vibration différente entre le mur et la voûte lors d'un séisme.

2 - FIN DE LA VOUTE

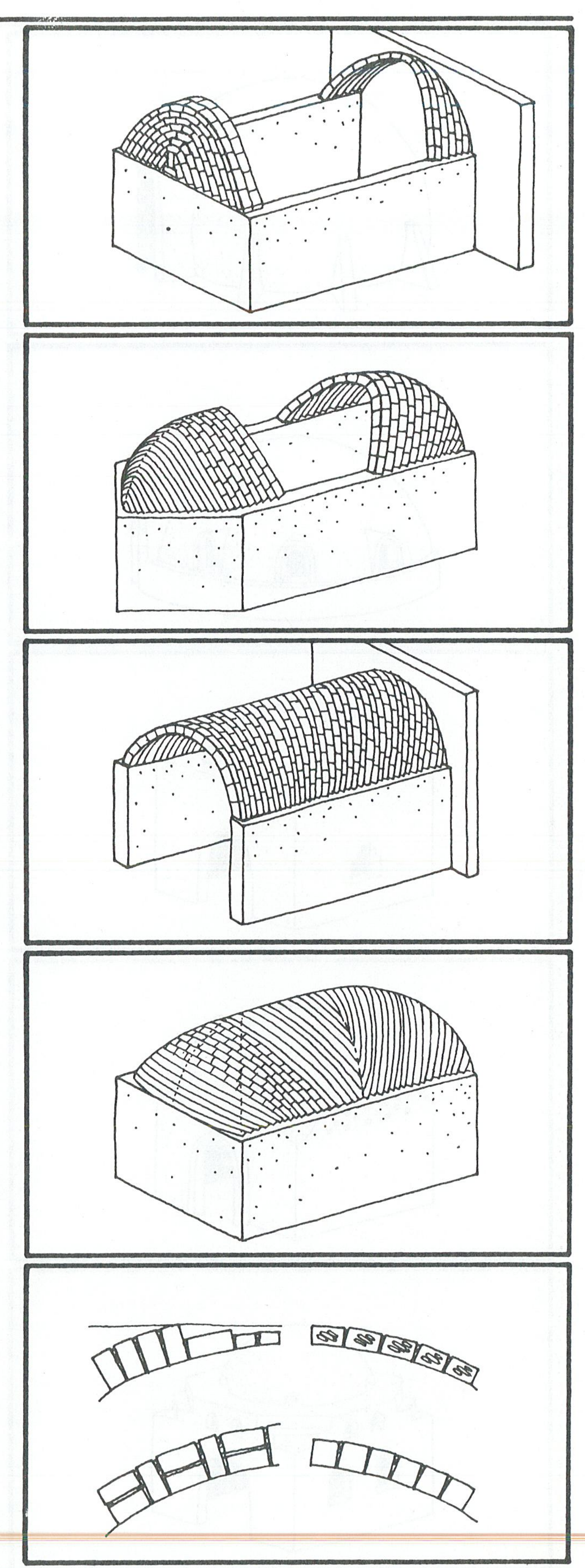
Il est possible de terminer la voûte en conservant l'inclinaison à 15° des assises mail il est préférable de la redresser peu à peu jusqu'à la verticale. La voûte peut alors s'appuyer sur un autre mur-pignon vertical ou bien l'on peut obturer le tympan en maçonnerie. On peut aussi démarrer simultanément les 2 pignons comme une coupole et faire rejoindre les assises au milieu de la voûte.

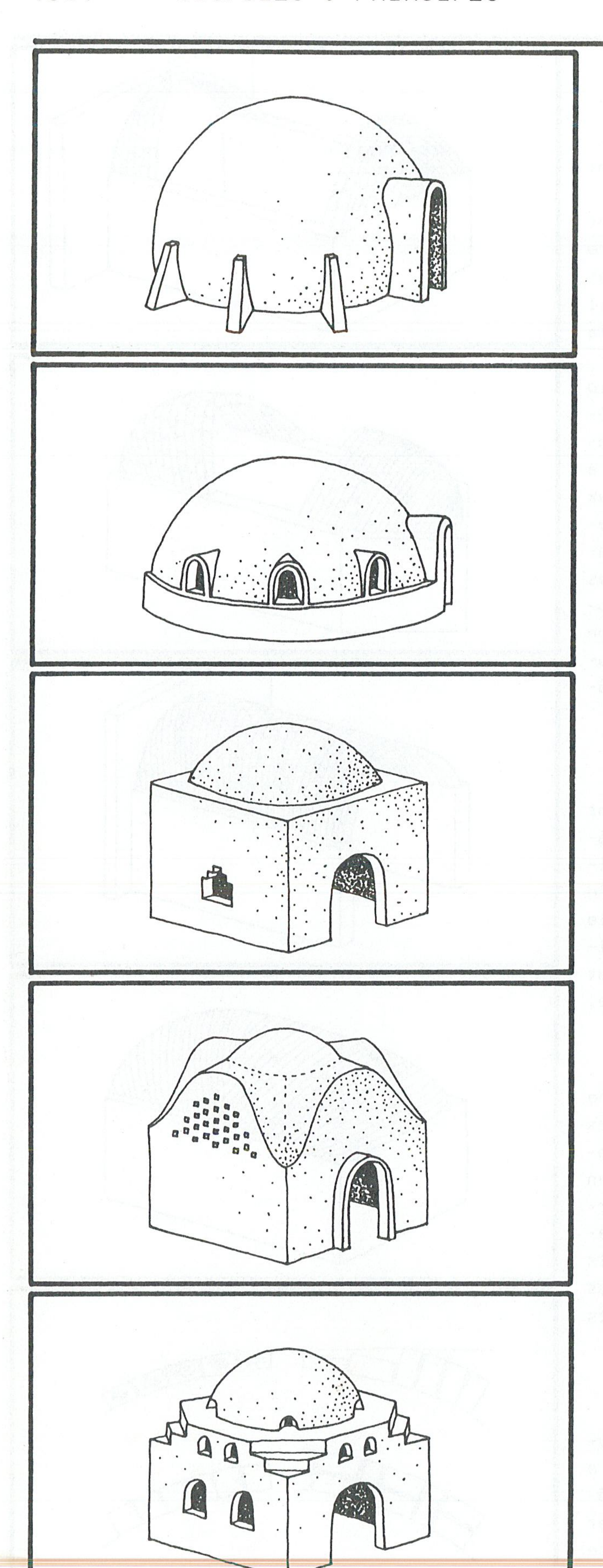
3 - PROFIL DE LA VOUTE

Il est d'aspect uniforme si on adopte le principe de l'inclinaison successive des assises avec les briques posées à plat. Mais l'on peut aussi obtenir des profils très esthétiques en adoptant un appareil en épis ou en chevrons. Les voûtes surbaissées peuvent aussi être bâties avec un appareil en boutisse et panneresse. Les appareils complexes doivent être très soignés et les briques bien calées aux joints, à l'extrados, par de petits cailloux.

MAIN-D'OEUVRE

En Nubie, 1 maître-maçon aidé de 4 manoeuvres couvrent 12 à 15 m² par jour. Pour une main-d'oeuvre non-expérimentée, les rendements sont très inférieurs. Il est dans ce cas conseillé d'employer un gabarit léger (en fil de fer p.e.) qui facilite la mise en oeuvre et donne une courbure régulière.





La coupole est une voûte de plan circulaire dont l'intrados est tracé par la rotation d'un arc générateur sur un axe vertical. A l'égal de l'arc ou de la voûte, la coupole a l'avantage de faire travailler le matériau en compression.

DOMAINES D'APPLICATION

La coupole sert le plus souvent à couvrir la totalité des espaces. Comme la voûte, la coupole est peu adaptée aux régions très pluvieuses. Face aux séismes, les coupoles se comportent bien; ce sont plutôt les murs qui sont fragiles et qui doivent être bien dimensionnés ou renforcés : contreforts, chaînage. En architecture, la coupole pose quelques problèmes de dimensionnement des espaces: des hauteurs importantes sont atteintes avec des coupoles non-surbaissées. Le diamètre courant des coupoles en adobe est de 4 m (Iran) mais l'on a atteint les 7 à 10 m avec des blocs comprimés stabilisés. Un autre problème est la résonnance acoustique de la coupole qui la rend inadaptée à certains programmes sans traitement spécial : appareils élaborés ou tissus tendus p.e. Les coupoles de forme simple et construites isolément sont faciles à réaliser mais lorsqu'un projet multiplie les systèmes de coupoles, d'arcs et de voûtes, le chantier exige une parfaite organisation et une main-d'oeuvre expérimentée. Il est aussi possible de réaliser des coupoles bi-couches où l'extrados est surhaussé et l'intrados surbaissé p.e. : on obtient ainsi un tampon d'air isolant entre les 2 couches et une meilleure pente de drainage des pluies. Les coupoles peuvent être percées de baies sans compromettre leur stabilité (sauf en zone sismique). L'étanchéité est traditionnellement réalisée avec des chapes (bitume, chaux p.e.) ou en revêtements de terre cuite et céramique (Iran p.e.).

FORMES

Elles se définissent en coupe et en plan. En coupe, on peut obtenir pratiquement toutes les formes engendrées par les arcs et voûtes. Les plans peuvent être circulaires, elliptiques, carrés, rectangulaires (coupole barlongue), etc... On connaît aussi l'emploi de la demi-coupole ou voûte en cul-de-four.

TRACAGE

Les coupoles sphériques simples sont faciles à tracer mais les plans les plus élaborés exigent de s'en référer à des calculs géométriques de grande complexité (mosquées de la tradition iranienne p.e.).

DECORATION

Qu'elle soit intérieure ou extérieure, réalisée à partir d'appareils de briques très élaborés ou d'enduits, de peintures, de plaçages de céramique, la décoration des coupoles ne connaît pas de limites si ce n'est celles de mauvais goût.

SUPPORT DES COUPOLES

Il peut être très varié en fonction du plan qui exigera une adaptation de la hauteur des murs, du diamètre de la coupole, de son centrage. Une coupole sphérique sur plan circulaire ne pose aucun problème mais les plans carrés ou rectangulaires ou pentagonaux engendrent des tracés complexes et exige la construction de supports intermédiaires tels que trompes ou pendentifs.

1 - TROMPES

Ce sont des petites voûtes formant support, le plus souvent en fraction de cône ou en cul-de-four, en plein-cintre avec arc de front, bâties aux angles rentrants des plans polygonaux et servant à multiplier les facettes de ces plans pour approcher le plan circulaire, facilitant ainsi le départ de la coupole. L'emploi des trompes tend à élever la hauteur des coupoles.

2 - PENDENTIFS

Ce sont des trompes dont l'intrados est un triangle sphérique concave. L'emploi des pendentifs rabaissent la hauteur des coupoles. Les coupoles sur pendentifs, barlongues, byzantines et Renaissance sont les formes les plus connues.

3 - LINTEAUX

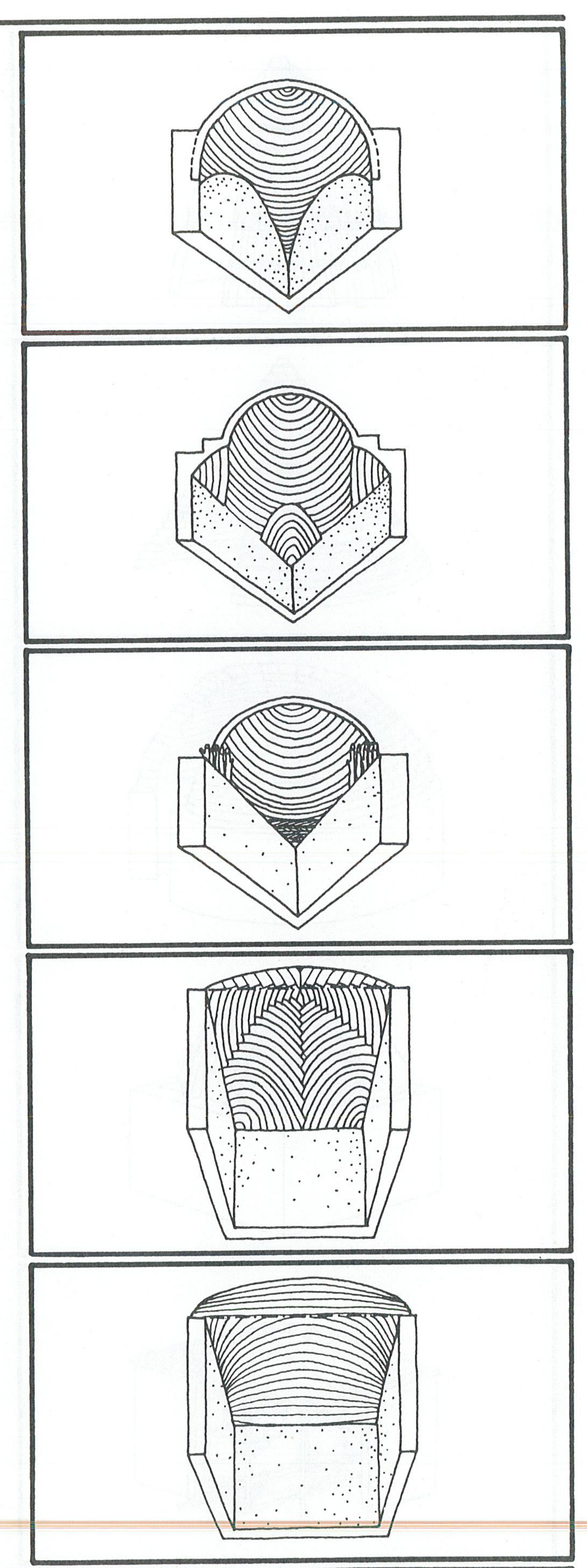
Ils sont placés aux angles rentrants, et réalisés en bois , en acier ou en béton. Le matériau est réduit mais le système travaille en traction.

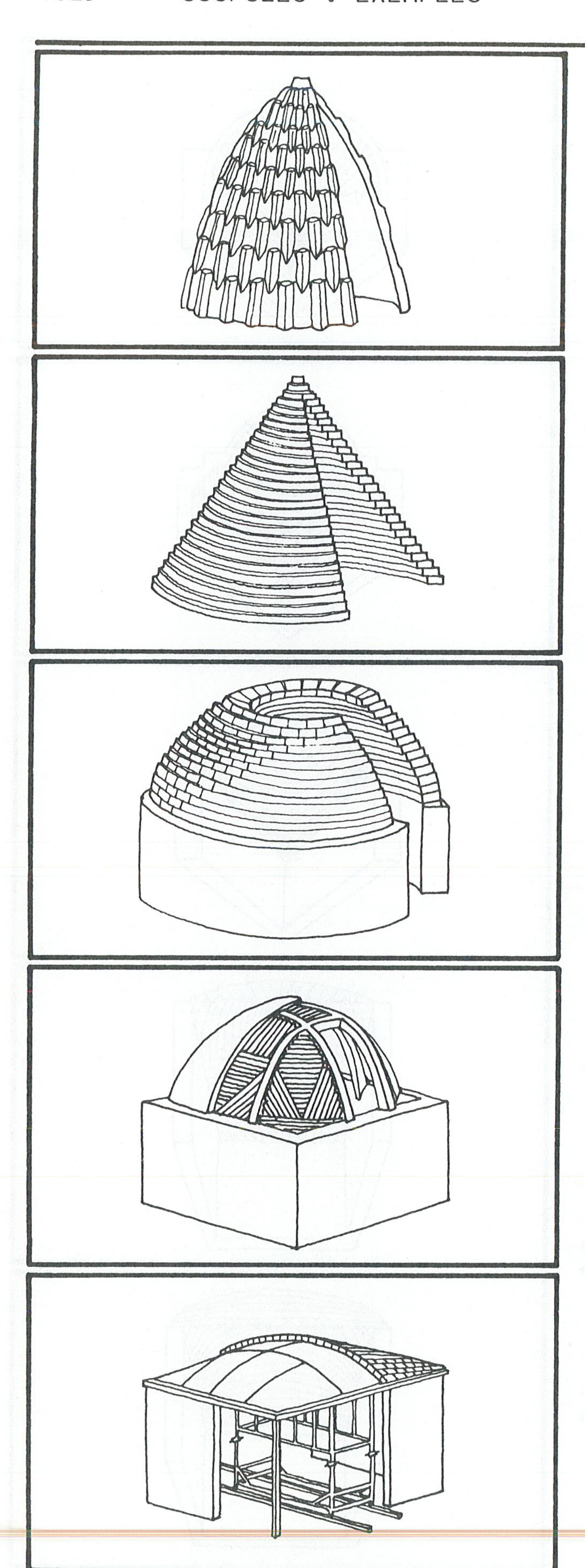
4 - DEPART AUX ANGLES

La coupole est démarrée aux 4 angles, simultanément, comme s'il s'agissait d'une voûte. A la jonction des assises, l'inclinaison peut être de 45°.

5 - DEPART SUR LES MURS

La construction s'opère comme pour une voûte mais il est difficile de faire joindre les deux départs à la même hauteur et avec la même courbure.





SYSTEMES CONSTRUCTIFS

1 - COUPOLES MONOLITHIQUES

Ce sont des coupoles façonnées à la main selon les techniques de la poterie adaptées à l'architecture. Par exemple, les fameuses cases-obus de l'ethnie Mousgoum du Cameroun, dont les témoignages sont de plus en plus rares : une coque de terre très cohésive spécialement préparée, épaisse de 15 à 20 cm en sa base et de 5 cm en son sommet, haute de 7 à 8 m, construite sans échaffaudage grâce à des reliefs en surface servant de marchepieds tout en divisant le ruissellement des pluies pour réduire l'érosion. Des adaptations modernes avec des boudins de terre extrudée ont été tentées au T.H.K. (Allemagne).

2 - COUPOLES EN ENCORBELLEMENT

Elles sont dressées par assises horizontales successives qui tiennent grâce à la force d'adhérence et de cohésion du mortier. Ce principe est adapté pour des formes coniques ou pour des formes pyramidales (projets au Honduras dans les années 80) mais la mise en oeuvre est très lente car il est nécessaire de prendre un délai de séchage toutes les 2 ou 3 assises de briques.

3 - COUPOLES EN ASSISES INCLINEES

Il s'agit du principe de construction développé par la construction traditionnelle nubienne(Haute-Egypte) et repris par les travaux de Hassan Fathy (projet du nouveau village de Gourna). Le système de construction est très astucieux et rapide. Les briques sont appareillées en anneaux indépendants régulièrement inclinés (10° à 15°) afin de diminuer leur tendance au glissement, jusqu'à fermer la coupole. Ce type de coupole est le plus souvent élevé sur pendentifs.

4 - COUPOLES SUR COFFRAGE PERDU

Ce système est typique de l'architecture du Niger et du Nigeria p.e. La coupole est construite en bois de brousse et petites branches puis recouverte de terre qui assure la rigidité de la structure et son étanchéité. A l'intérieur, les nervures en bois principales sont également enduites de terre.

5 - COUPOLES SUR COFFRAGES

Le coffrage est indispensable pour les coupoles très surbaissées. En Inde, des coques funiculaires (qui transmettent des forces verticales uniformes) de 5,20 m de portée et de 60 cm de flèche ont été construites. Le coffrage doit être léger et mobile, démontable pour être efficace.

MISE EN OEUVRE
COUPOLES EN ASSISES INCLINEES

Elles se construisent en anneaux fermés indépendants. On peut aussi les construire en spirale continue à partir de 2 ou 3 points opposés : les assises se chevauchent sans se rejoindre. 2 à 3 maçons expérimentés construisent ainsi une coupole de 3 m de ϕ en 1 jour. Par principe, on ne doit pas trop compter sur le mortier : les briques doivent tenir d'elles-mêmes par friction. On cale l'ouverture des joints à l'extrados par des petits cailloux. On peut aussi bâtir les briques en oblique pour augmenter les forces de friction : des éléments trapézoïdaux corrigent l'orientation oblique et servent de clefs. Comme pour les voûtes les assises sont inclinées à 10-15°.

BRIQUES

Les briques classiques employées sont des adobes de petite taille, carrées ou rectangulaires, légères (chargées en paille) ou des blocs comprimés stabilisés épais de 5 à 6 cm. Des rainurages ou des griffes améliorent l'adhérence des briques. L'épaisseur courante des cônes varie de 10 à 30 cm avec une fréquence de 15 cm pour des portées de 3 à 4 m.

FINITION

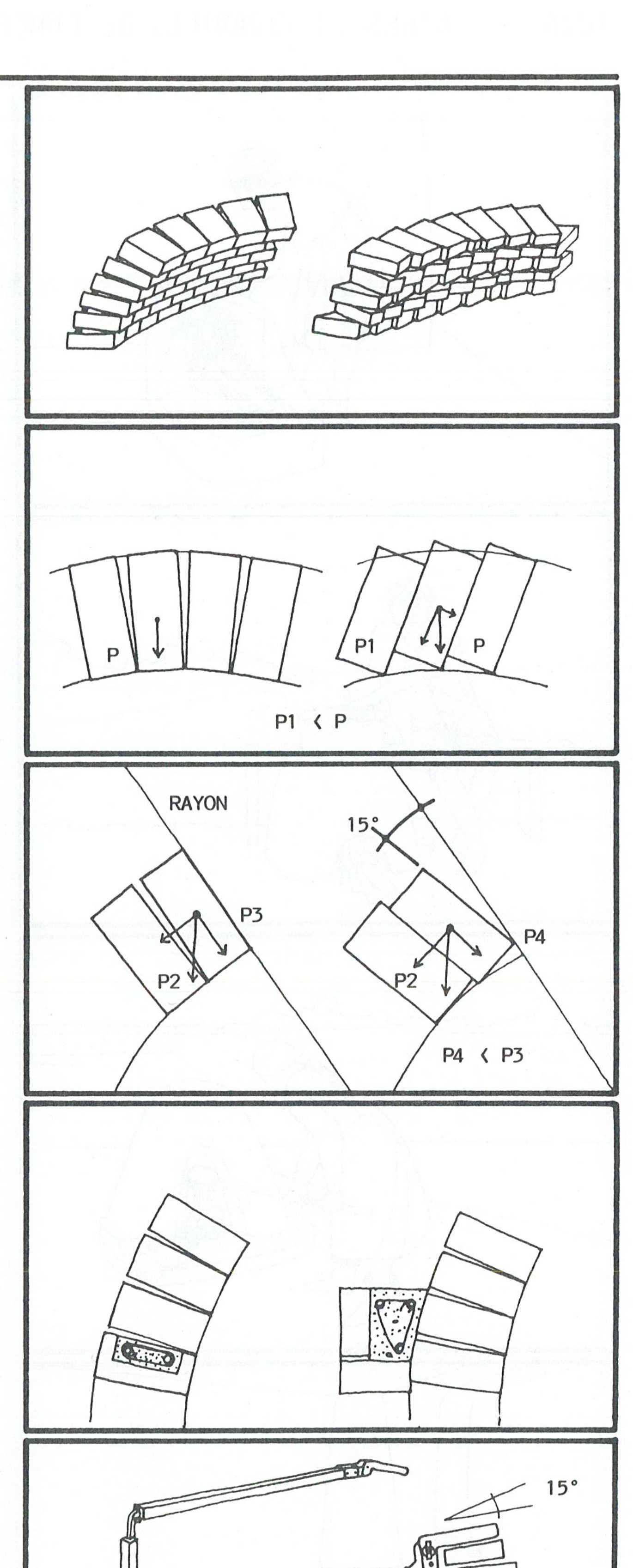
Pour des appareils soignés et un bon grattage des joints, la finition intérieure peut être un simple badigeon. Pour l'extérieur, un enduit assez épais garantira une belle finition et une bonne étanchéité.

CHAINAGE

S'il est prévu, il est positionné à la base de la coupole, au-dessus des pendentifs ou des trompes, coulé sur place, dans l'épaisseur de la coupole ou même rapporté sur l'extrados.

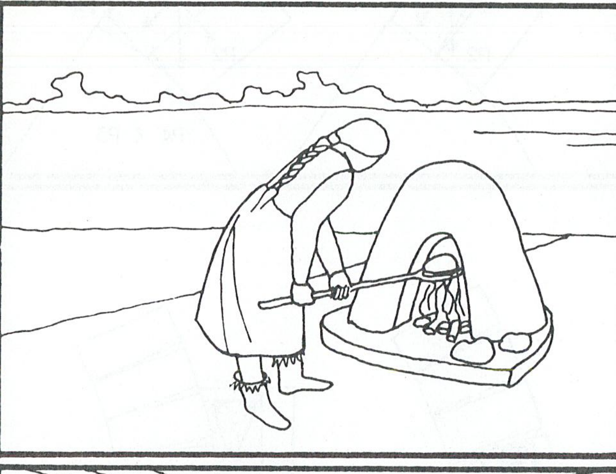
OUTILS

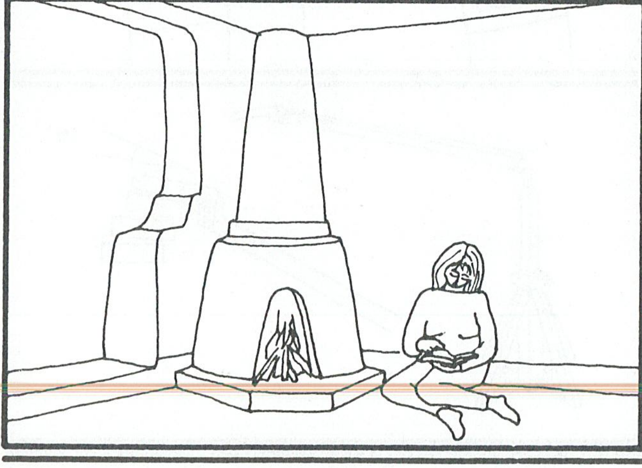
Traditionnellement, ces coupoles sont dressées sans outil. L'oeil du maçon suffit, aidé d'un cordeau attaché au foyer de la coupole et au poignet du maçon. Un outil a été élaboré qui laisse la main libre : le trace dôme ou pige qui est en fait un rayon mobile et qui donne la position de chaque brique ainsi que leur bonne inclinaison à 10-15°. Ce trace dôme, le plus souvent en bois, rigide tout en étant articulé permet de maintenir les briques pendant quelques instants. Différentes piges peuvent être imaginées, équipées de bielles, pivots ou excentriques qui permettent de tracer n'importe quelle forme de coupole. Cet outil est facile à manipuler et n'encombre pas l'aire du travail, donne une forme parfaite à la coupole. On peut aussi employer des gabarits en bois ou métalliques pivotant sur un axe mais leur emploi est moins pratique que la pige car l'espace doit être parfaitement dégagé.











DOMAINE D'APPLICATION

L'emploi du matériau terre connaît un très large domaine d'application jusqu'à permettre la construction de fours et fourneaux, âtres et conduits de fumée. Ces équipements fonctionnent bien mais exigent un entretien assez régulier sous risque de se dégrader assez rapidement. Force est-on obligé de reconnaître que les matériaux de terre cuite sont plus adaptés à la confection de tels équipements et qu'ils sont nettement plus durables. L'emploi de la terre crue sous forme de matériau monolithique - pisé ou bauge p.e. - n'est pas conseillé pour réaliser des cheminées ou âtres du fait de problèmes de fissurations et de retrait et on pourra par contre employer des briques de terre comprimées stabilisées ou des adobes particulièrement denses.

CORPS CHAUFFANT

Deux possibilités se présentent : ou bien l'on construit l'âtre et le corps chauffant qui l'entoure en terre crue, ou bien l'on construit l'âtre en terre cuite et le corps chauffant en terre crue. Si la terre est très argileuse, la mise à feu de l'âtre provoquera des fissures de retrait qu'il faudra reboucher avec soin. Si la terre est moins argileuse, la chaleur provoquera une dessiccation et le matériau perdra de sa cohésion, deviendra friable. Ce sont les problèmes de la cuisson à basse température car 600° à 900°C sont nécessaire pour faire une bonne terre cuite.

ATRES ET CONDUITS DE CHEMINEE

Si les fours peuvent être construits en terre crue pour le parement intérieur, mais plutôt en terre cuite pour le parement extérieur, les foyers de cheminées doivent être construits en briques réfractaires : la fissuration intérieure d'un four est acceptable, elle l'est moins pour une cheminée d'intérieur. Le mortier employé peut être de terre non-stabilisée ajoutée de brique cuite pilée qui sert de sable. Toutes les fissures du corps chauffant sont rebouchées avec soin. Les conduits en terre crue sont déconseillés. On préfèrera la terre cuite, incorporée dans l'épaisseur des murs ou rapportée à l'extérieur : conduits en façade. Cette précaution garantit la stabilité des conduits et contre le risque d'échappée de gaz nocifs par des fissures. En intérieur, les conduits peuvent être enduits en terre crue mais les souches, en toiture, sont en terre cuite.

MISE A FEU

Le feu ne pourra être allumé qu'après un parfait séchage de la maçonnerie du four ou de l'âtre. Le premier feu sera modéré et à combustion lente car un feu violent risque de disloquer la structure. Le refroidissement devra être également lent. On augmentera légèrement la température avec le deuxième feu tout en provoquant, en fin de combustion, lorsque l'âtre est chaud donc dilaté, une émission volontaire de fumée (feuilles humides p.e.) qui permettra de constater une éventuelle échappée de fumée par des fissures qui seront localisées et rebouchées. A la liaison de la terre et de pièces métalliques (couvercle du four p.e.), on peut appliquer du sel qui, en cuisant, obturera hermétiquement les fissures.

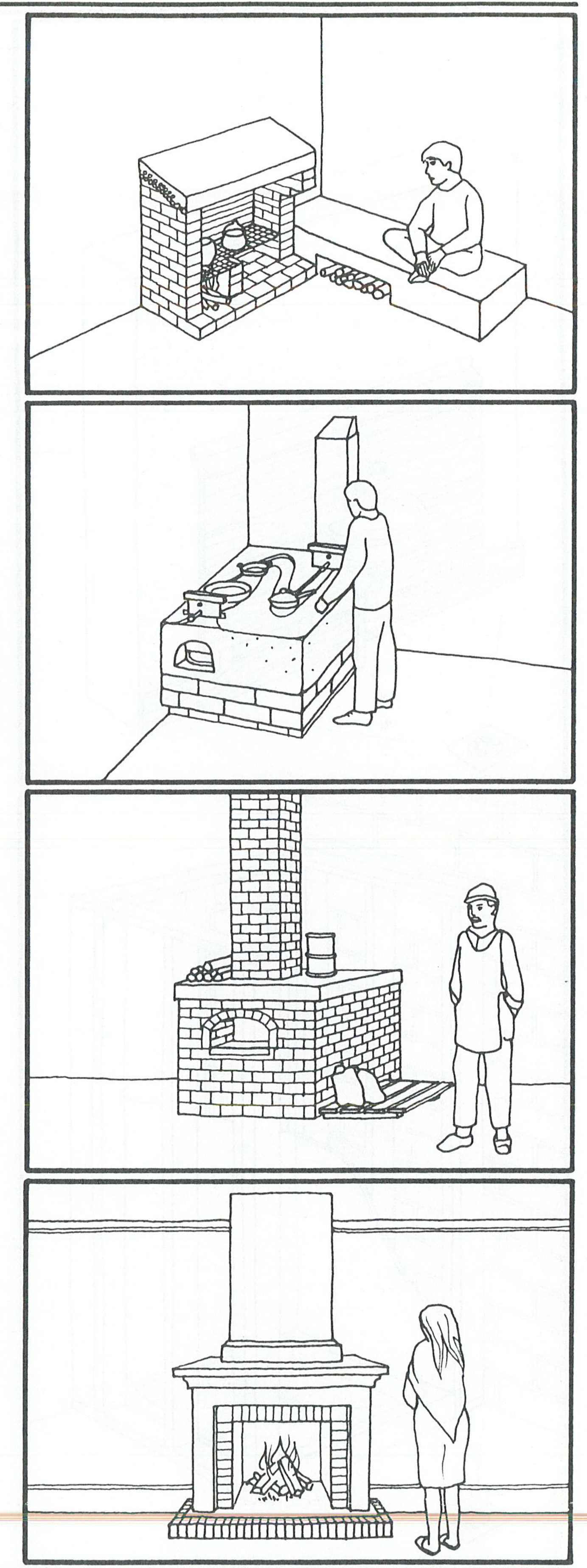
APPLICATIONS

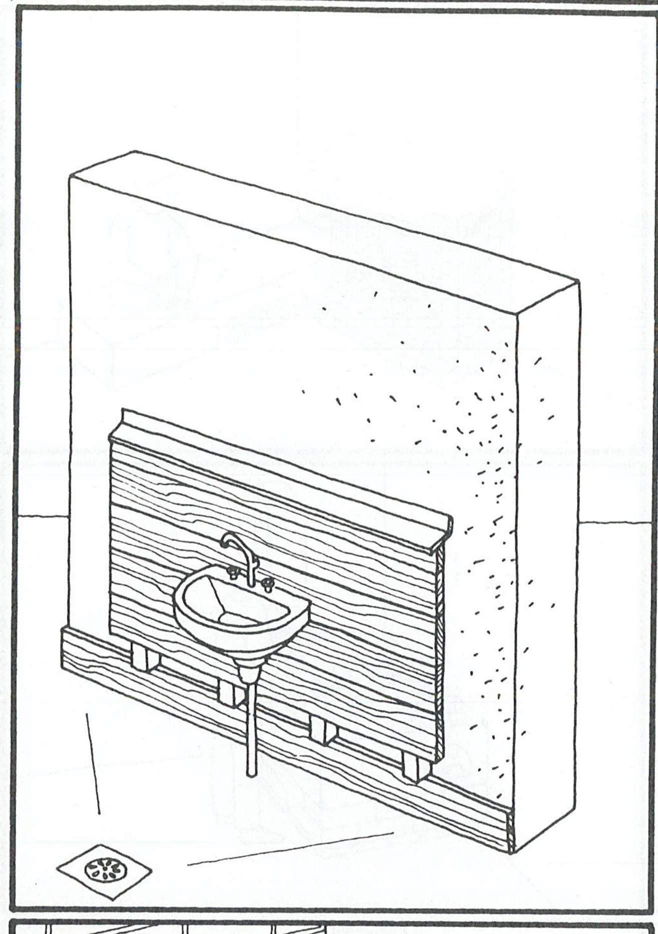
1 - FOURNEAUX : de nombreux organismes ou instituts de technologie appropriée ont diffusé des modèles de fourneaux-cuisinières en terre améliorés. Certains sont connus, tels le herl chula (Inde) ou les pouna, lorena, singer. Ces fourneaux en terre consomment 10 à 20% de moins de bois que les fours à feu ouvert classiques. Le principe commun à la plupart de ces fourneaux est celui dans tunnel chauffant traversant une masse de terre.

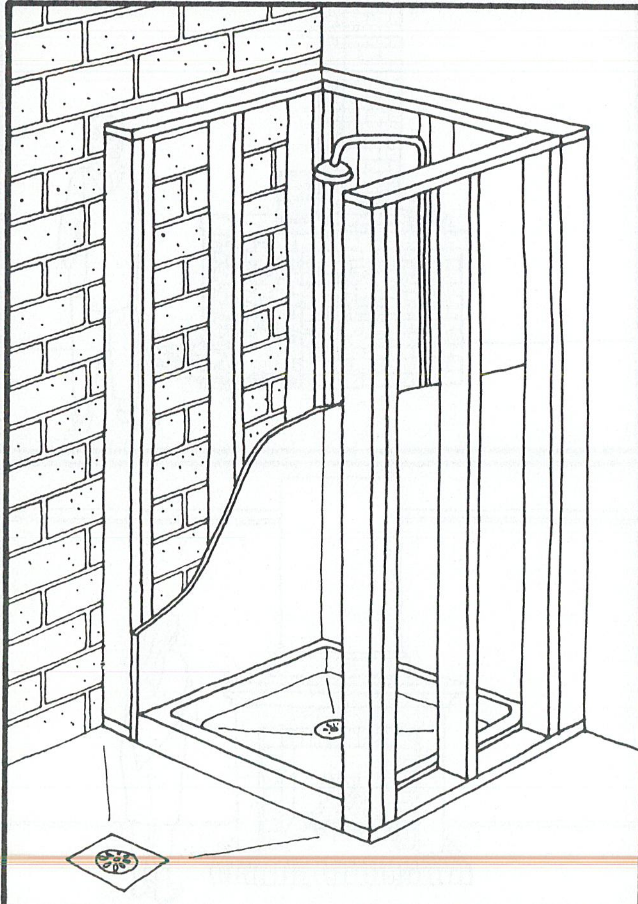
2 - FOURS : ce sont très souvent des structures en forme de voûte ou de coupole conique (fours des indiens Pueblos p.e.). Les parois doivent être assez épaisses et la hauteur limitée à 60 cm pour retenir la chaleur. Le socle du four peut être en briques crues ou cuites couvrant une couche de sable et de verre pilé qui retient bien la chaleur.

3 - FEUX OUVERTS, ATRES : leur construction en adobe se pratique couramment et ne pose pas de problèmes majeurs. Dans les maisons en adobe du Sud-Ouest des U.S.A., le feu ouvert est souvent présent dans chaque pièce et connote l'"Adobe Style". On ne doit pas oublier qu'une cheminée à feu ouvert en terre est lourde et prévoir de bonnes fondations ni omettre les précautions d'usage qui garantiront contre les risques d'incendie : ne pas mettre de linteau en bois ou de poutre traversant le conduit p.e. Il est préférable de faire les foyers en briques réfractaires.

4 - CHAUDIERES, POELES : on connaît p.e. le K'ang chinois ou coréen : une masse de terre chauffée par la fumée de l'âtre qui rayonne sa chaleur.







PLOMBERIE

L'installation de conduites d'alimentation ou d'évacuation de l'eau, dans une maison en terre,exige un soin particulier. En effet, les risques de pathologie humide peuvent avoir de graves conséquences. Par principe, on essaiera de centraliser le plus possible le réseau de plomberie afin d'en faciliter le contrôle et l'entretien tout en évitant de multiplier le risque de dégradation difficile à localiser. Toute l'eau doit être acheminée à l'extérieur de la maison et bien à l'écart des fondations. Les caniveaux et regards devront être bien entretenus. A l'intérieur de la maison, on soignera plus particulièrement l'équipement des pièces d'eau : cuisine, sanitaires, bains car le risque d'humidité y est important. Ces pièces seront ventilées et munies de siphons de sol, bien dégagés; les sols auront une pente de drainage suffisante. Les équipements du type douche seront séparés des murs de terre qui seront protégés de revêtement imperméables ventilés (risque de condensation). On veillera aux conduites qui peuvent produire une condensation : conditionnement d'air, chauffage p.e. Cette eau de condensation doit pouvoir être évacuée : inclinaison suffisante des conduites, systèmes de goulottes de récupération ou bien isolation des conduites.

1 - POSITION DES CONDUITES

L'incorporation des conduites dans les murs de terre est déconseillée. On profitera au mieux des systèmes constructifs autres que ceux bâtis en terre - soubassements en dur, chaînages verticaux et horizontaux, ossature bois - pour fixer les conduites. Cette fixation se fera à l'écart des murs de terre, en réseaux apparents, centralisés (descentes p.e.) et visitables (en cas de gaines spéciales). Tous les raccords seront soignés afin d'éviter les fuites.

2 - FIXATIONS

Les points d'ancrage des conduites et équipements doivent être prévus par avance. Des blocs en bois, surdimensionnés, bien ancrés dans les murs permettront la fixation de consoles,pattes et bracelets. Les lavabos, éviers, chauffe-eau, vases d'expansion, etc ... seront fixés sur des bardages en bois verticaux qui seront ventilés. On protègera les murs de tous risques d'éclaboussures : parements de protection et plinthes.

ELECTRICITE

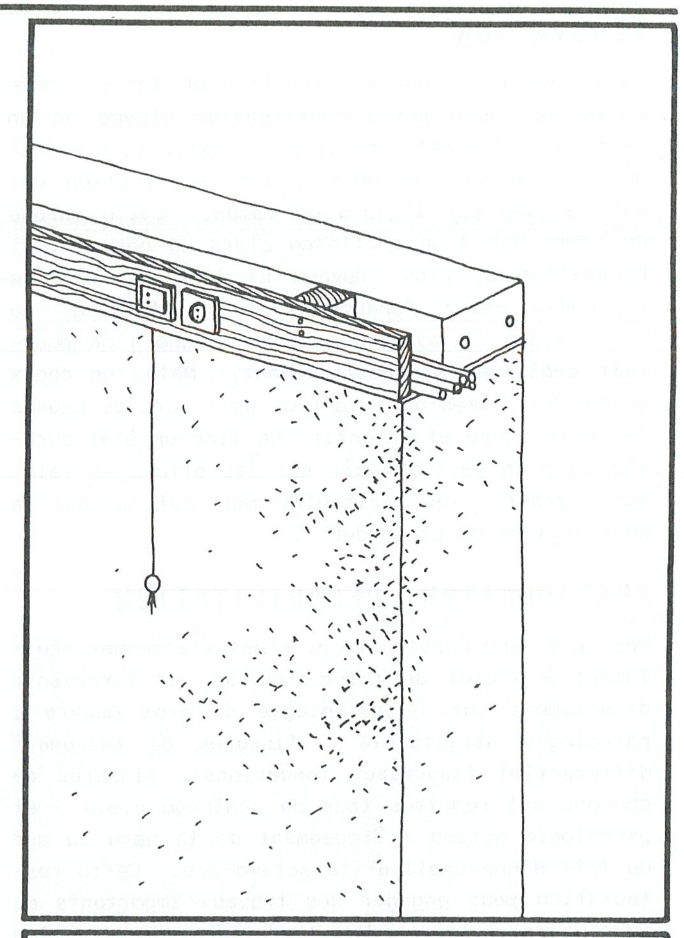
L'alimentation en électricité d'une maison en terre,comme toute autre maison se fait par connection au réseau existant. Lorsque le réseau est souterrain, le branchement ne pose aucun problème et peut s'effectuer au niveau de bornes et d'armoires - compteurs extérieurs. Dans le cas de projets de lotissement importants, cette connection de réseaux d'électricité avec les maisons est prévue par avance. Par contre, dans le cas d'un réseau aérien, le problème du branchement du réseau câblé à la maison doit être solutionné avec soin. En effet, les câbles sont lourds et, une fois tendus, induisent des efforts en traction, des vibrations. Il est donc déconseillé d'ancrer les consoles de branchement des réseaux câblés directement dans les murs de terre mais plutôt dans les parties de la maison qui résistent aux sollicitations en traction : chaînages verticaux et horizontaux p.e.

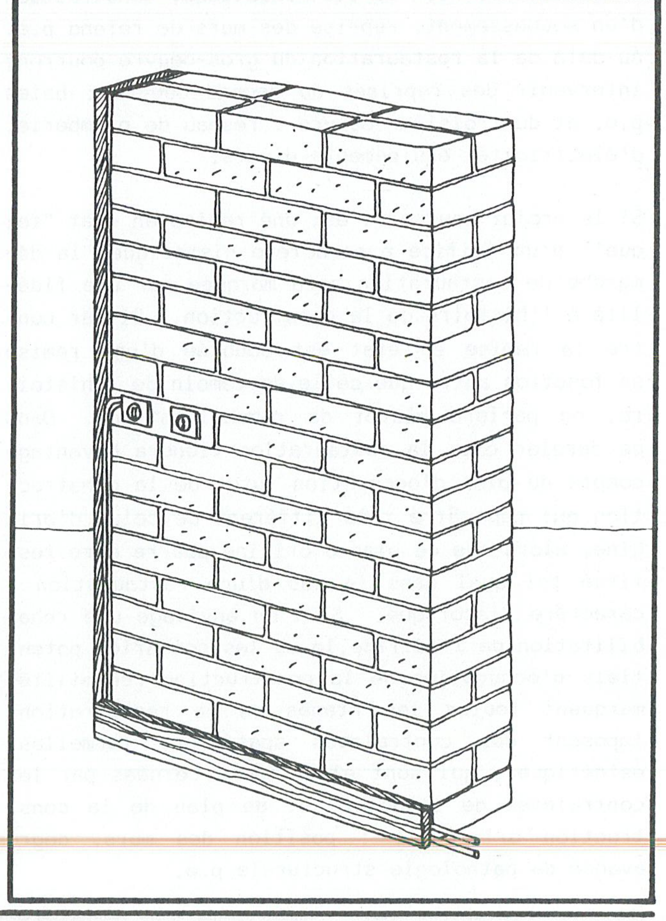
1 - CABLAGE

Les câblages gainés ainsi que tous les conducteurs blindés doivent être de préference incorporés dans l'épaisseur des dalles ou chapes de sol, assez traditionnellement, ou dans les soubassements en "dur" où l'on aura prévu à cet effet des réservations ou des points d'ancrage. On profitera au maximum des autres matériaux que la terre - bois, béton - pour réaliser les fixations : charpente pour les projets en terre-paille p.e. D'une manière générale on évite de saigner les murs de terre pour y intégrer le câblage mais cette solution demeure possible si l'on prévoit un enduit : les saignées sont alors recolmatées de terre ou de mortier et enduites sur un grillage. Il est assez astucieux d'utiliser les plinthes, les chambranles de portes ou de prévoir une gaine de câblage au niveau du chaînage, ou dans l'épaisseur des planchers.

2 - FIXATION

Les interrupteurs et prises de courant peuvent être encastrés ou apparents. Encastrés, ils le seront très profondément; on utilisera à cet effet un matériel bien dimensionné. Les scellements peuvent se faire au plâtre. Apparents, ils seront de préference fixés sur les soubassements,en plinthes, en précadres de baies, sur les ossatures verticales en bois. Pour une fixation dans les murs de terre, on prévoira par avance des blochets de fixation intégrés aux murs, chevillés dans des scellements au plâtre profonds.





RENOVATION

La rénovation d'une construction en terre, comme celle de toute autre construction élevée en un matériau différent, consiste par définition à donner l'apparence du neuf à une construction qui est marquée par l'usure du temps. Cette marque du temps que l'on s'efforce alors de gommer peut nécessiter de gros travaux si l'on envisage de reprendre assez fondamentalement l'édifice, ou des travaux de moindre importance que l'on pourrait qualifier d'embellissement. Mais, un choix majeur est immédiat : va-t-on agir sur les causes de cette usure et garantir une mise en état durable ou bien va-t-on agir sur les effets en laissant perdurer les véritables maux qui ruinent la construction en profondeur ?

RESTAURATION, REHABILITATION

Restaurer une construction, c'est s'attaquer réellement à l'état de ruine existant et intervenir directement sur la pathologie du gros oeuvre : pathologie structurale - fissures de tassement différentiel (mauvaises fondations), fissures de charges mal reprises (pas de chaînage p.e.) - et pathologie humide : creusement de la base du mur du fait d'une capillarité active p.e. Cette restauration peut engager des travaux importants en sous-oeuvre : reprise des fondations, construction d'un soubassement, reprise des murs de refend p.e. Au-delà de la restauration du gros-oeuvre pourront intervenir des reprises du second oeuvre : baies p.e. et du troisième oeuvre : réseau de plomberie, d'électricité, équipements divers.

Si le projet poursuivi est une remise en état "tel quel" d'un édifice à caractère historique, la démarche de restauration sera marquée par une fidélité à l'histoire de la construction. Si par contre la remise en état est doublée d'une remise en fonction autre que celle de témoin de l'histoire, on parlera plutôt de réhabilitation. Dans ce dernier cas, la restauration tiendra davantage compte du plan d'occupation futur de la construction qui peut être très différent de celui d'origine, alors que ce plan d'origine pourra être restitué tel quel dans le cas d'une restauration à caractère historique. Si l'on envisage une réhabilitation de l'édifice,le ou les scénarios potentiels d'occupation de la construction réhabilitée marquent toutes les étapes de la restauration, imposent des contraintes spatiales, formelles, esthétiques, qui sont elles-mêmes cernées par les contraintes de structure et de plan de la construction originelle : position des murs, degré avancé de pathologie structurale p.e.

Ainsi, la réhabilitation, plus que la restauration est davantage concernée par les réponses pratiques que l'on apportera à des besoins d'usage de la construction, plutôt que par des réponses à une image historique de l'édifice. Au-delà des précisions apportées à la problématique engagée, s'imposent très rapidement des contraintes de budget car l'une ou l'autre des démarches induira un coût très différent. En effet, la définition rigoureuse de l'estimation des travaux engagés, garantit la réelle faisabilité de l'opération et surtout son achèvement dans des délais acceptables. Une telle estimation exige l'intervention d'un spécialiste car il est sans doute plus difficile de bien restaurer et/ou de réhabiliter une construction en terre que de construire un édifice neuf. L'expertise de l'état pathologique et les solutions de traitement envisagées, les techniques de restauration utilisées déterminent directement le coût de l'opération. Cette estimation ne doit pas être faite à la légère mais en parfaite connaissance des problèmes et des solutions. C'est pourquoi l'on définira le programme d'intervention étape par étape : recherches historiques, réalisation d'un métré précis, expertise pathologique (notamment pour la pathologie humide qui peut exiger un assèchement des murs, une remise à niveau et un drainage du terrain naturel), scénario d'usage, détails des systèmes constructifs, finitions. Le budget définira les possibilités et les moyens, notamment p.e. pour les reprises en sous-oeuvre - fondations, soubassement, mur drainage, planchers, charpente, ouvertures - qui peuvent être très coûteuses. Il faudra en tout cas donner la priorité aux problèmes majeurs : résorption de la pathologie humide p.e. et consolidation de la structure.

PRESERVATION

La préservation des architectures de terre à caractère historique est une démarche engagée en de très nombreux pays qui vise une remise en état et en valeur d'un patrimoine bâti dont l'importance culturelle est majeure. Au-delà d'une intervention sur quelques bâtiments isolés, il s'agit aujourd'hui de la préservation de sites archéologiques parfois très vastes. On pense notamment aux pays du Moyen-Orient où les témoignages des prestigieuses civilisations de Mésopotamie, Elam, Sumer, Babylone risquent de disparaître par manque d'entretien ou à cause de techniques de restauration incompatibles avec le matériau terre qui risquent d'aggraver la ruine de ces sites. Ce problème est en fait assez universel et engage aujourd'hui la survie des témoignages de l'ensemble des grandes civilisations historiques marquées par un patrimoine architectural en terre crue, sur la plupart des continents.

La préservation des sites archéologiques ou de monuments historiques en terre crue pose des problèmes très délicats. Car le matériau terre exige des traitements appropriés qui peuvent exclure des techniques de restauration adaptées à d'autres matériaux : problème des enduits imperméables p.e. qui peuvent activer une pathologie humide -barrage à l'évaporation de la vapeur d'eau migrant à travers les parois; problèmes du savoir-faire permettant une restauration des édifices avec les techniques de constructions originelles. Au-delà de cette spécificité du matériau terre, se posent les problèmes communs à toute opération de préservation d'un édifice à caractère historique.

Doit-on :

- Laisser le monument ou le site tel qu'il se présente et s'efforcer de le maintenir en l'état actuel, quel que soit le degré avancé de ruine ? Ce sont alors pour l'essentiel des techniques de protection, de mise à l'abri, ou de stabilisation du matériau.
- Améliorer les conditions d'environnement qui semblent activer la ruine du site ou de l'édifice afin que le processus de dégradation engagé cesse? Ce sont alors des techniques de drainage p.e., de nivellement du terrain, de réduction des ravinements (plantations p.e.).
- Reconstruire partiellement ou entièrement les édifices et tenter de leur redonner une apparence originelle ? Ce sont alors des travaux de démolition et de reconstruction qui exige une grande compétence technique afin de ne pas activer la ruine des édifices ou les défigurer.

Il existe aujourd'hui des organismes internationaux qui multiplient les colloques et séminaires sur ce thème de la préservation des sites et édifices historiques. Par exemple, l'ICCROM - International Centre for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property - fondé par l'Unesco en 1959 et qui agit en temps qu'organisation scientifique intergouvernementale, autonome. Les fonctions sont diverses : collecter et étudier la documentation technique et scientifique concernant ce thème de la préservation de la propriété culturelle, coordonner et stimuler des instituts de recherche agissant dans ce sens, donner des conseils et recommandations techniques pratiques,contribuer à la formation de compétences dans ce domaine. Egalement, ICOMOS -International Council of Monuments and Sites - qui multiplie les séminaires internationaux : Yazd (Iran), 1972, Santa Fe (U.S.A.), 1977, Ankara (Turquie), 1980, Cuzco (Pérou), 1983.

Au-delà des actions engagées par ces organismes internationaux peuvent être définies des méthodes de préservation des sites et édifices en terre crue :

1 - Protéger le site ou l'édifice : on construit une superstructure qui couvre l'édifice laissé tel quel après en avoir renforcé quelques parties dangereuses.

2 - Réaliser une carapace: l'édifice est recouvert d'un enduit au ciment hydrofuge p.e.

3 - Blindage : des injections de produits dans la masse maintiennent l'état et l'on espère une durabilité satisfaisante.

4 - Destruction et reconstruction en s'efforçant d'être le plus fidèle possible.

Les produits employés pour stabiliser le matériau sont du type : fluosilicates de sodium, silicate de soude, résines époxy, polyestères et mousses de polyuréthane, silicate éthylique, liants traditionnels, ciment et chaux p.e., enduits à base de terre. Les recherches actuelles visent une efficacité à long terme de ces produits et des codes de bonne pratique pour leur emploi correct.

- Adam, J.A. Wohn-und Siedlungsformen im Süden Marokkos. München, Georg D.W. Callwey, 1981.
- ADAUA. Chantier d'essais. Genève, ADAUA, 1978.
- AGRA. Recommandations pour la conception des bâtiments du village terre. Grenoble, AGRA, 1982.
- An. Ausführungswarten der Decken. InNeue Bauwelt, Berlin, 1947.
- Auzelle. R.; Dufournet, P. Le béton de terre stabilisé. In Techniques et Architecture, Paris, 1946.
- Bardou, P.; Arzoumanian, V. Archi de terre. Marseille, éditions Parenthèses, 1978.
- Beitdatsch, A. Wohnhaüser aus Lehm. Berlin, Hermann Hübener, 1946.
- BRE. The thermal performance of concrete roofs and reed shading panels under arid summer conditions. In Overseas building notes, Garston, BRE, 1975.
- BRU. Fireplace in houses. In BRU data sheet, Dar-Es-Salaam, 1974.
- Carola, F. Recherche de systèmes économiques de construction. Rome, CONSASS, 1977.
- CRATerre. Projet de 8 logements de fonctionnaires. Grenoble, AGRA, 1982.
- CRATerre; GAITerre. Marrakech 83 habitat en terre. Grenoble, REXCOOP, 1883.
- Dalokay, Y. Lehmflachdachbauten in Anatolien. Technischen Univerversität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 1969.
- Dellicour, O. et al. Vers une meilleure utilisation des ressources locales construction. Dakar, UNESCO-BREDA, 1978.
- Denyer, S. African traditional architecture. New York, Africana, 1978.
- Dethier, J. Des architectures de terre. Paris, CCI, 1981.
- DIN. DIN Lehmbau 18951-18957. Berlin, DIN, 1956.
- Doat, P. et al. Construire en terre. Paris, éditions Alternatives et Parallèles, 1979.
- Evans, I.; Boutette, M. Lorena stoves. Stanford, Appropriate Technology Project of Volunteers in Asia, 1981.
- Fauth, W. Der praktische Lehmbau. Singen-Hohentwiel, Weber, 1948.
- Foadey, S.M. L'habitat en Afrique, contribution à l'étude des possibilités d'utilisation des matériaux locaux. Liège, Faculté des sciences appliquées, 1978.
- Fox, J. Building with zed tiles.
- Galván Duque, H. Peña Tomé, E. Cartilla de autoconstrucción para escuelas rurales. Mexico, Conescal, 1978.
- GATE. Lehmarchitektur, Rückblick-Ausblick. Frankfurt am Main, GATE, 1981.
- GATE. Low-cost self help housing. Eschborn, GATE, 1980.
- Gérard, V. De l'architecture traditionnelle à la construction scolaire. Paris, UNESCO, 1976.
- Hammond, A.A. Prolongation de la durée de vie des constructions en terre sous les tropiques. In Bâtiment Build International, Paris, CSTB, 1973.
- Harris, P; Earth roofs. In Adobe News. Albuquerque, Adobe News, 1977.
- Hays, A. De la terre pour bâtir. Manuel pratique. Grenoble, UPAG, 1979.
- Herbert, M.R.M. Some observations on the behaviour of weather protective features on external walls. In BRE, Garston, 1974.
- Herrera Delgado, J.A. et al. La tierra en el arquitectura una revalorizacion. Mexicali, Universidad autónoma de Baja Califórnia, 1978.
- Hölscher Wambsganz Dittus. Lehmbauordnung. Berlin, Von Wilhelm Ernst und Sohn, 1948.
- Hughes, R. Material and structural behaviour of soil constructed walls. In Techniques and materials, 1983.
- ICOMOS. International council of monuments and sites. Yazd, ICOMOS, 1972.
- Innocent, C.F. The development of English building construction. 1916.
- Iyad Ruwaih; Orhan Erol. Building damages caused by foundation failures in arid regions. In international journal IAHS, Pergamon press, 1984.
- Kuba, G.K.; Madibbo A.M. Polyethylene waterproofing for traditional mud roofs. Khartoum, BRD, 1970.
- Leroy, L.; Idabouk. Etude d'une voute surbaissée en BTS. Rabat, CERF, 1968.

- Liétar, V.; Rollet, P. Mayotte habitat social. Grenoble, AGRA, 1983.
- Markus, T.A. et al. Stabilised soil. Glasgow, University of Strathclyde, 1979.
- Matuk, S. Architecture traditionnelle en terre au Pérou. Paris, UPA.6, 1978.
- Mc Henry, P.G. Adobe and rammed earth buildings. New York, John Wiley and Sons, 1984.
- Mc Henry, P.G. Adobe build it yourself. Tucson, The university of Arizona press, 1973.
- Meunier, A. Technologie professionnelle de chantier. Les matériaux de construction. Paris, Foucher, 1958.
- Middleton, G.I. Build your house of earth. Victoria, Compendium Pty, 1979.
- Miller, T. et al. Lehmbaufibel. Weimar, Forschungsgemeinschaften Hochschule, 1947.
- Miller, T. Adobe or sun-dried brick for farm buildings. In Farmers bulletin, Washington, US Department of Agriculture, 1949.
- Ministerio de vivienda y construcción. Mejores viviendas con adobe. Lima, Ministerio de vivienda y construcción, 1975.
- Morales Morales, R. et al. Proyecto de bloque estabilizado. Estructuras. Lima, Universidad Nacional de Ingenieria, 1976.
- Moreno Garcia, F. Arcos y bóvedas. Barcelona, CEAC, 1978.
- Mukerji, K. et al. Dachkonstruktionen für den Wohnungsbau in Entwicklungsländern. Eschborn, GATE, 1982.
- Musick, S.P. The caliche report. Austin, Center for maximum potential building systems, 1979.
- Niemeyer, R. Der lehmbau und seine praktische Anwendung. Grebenstein, Oeko, 1982.
- Pering, C. Autoconstruction organisée. Lund, Ecole d'architecture de l'université de Lund, 1981.
- Perrin, H; Université Officielle de Bujunbura, Burundi. In Schweizer Baublatt, 1974.
- Pollack, E.; Richter, E. Technik des Lehmbaues. Berlin, Verlag Technik, 1952.
- Scarato, P. Les conditions actuelles de la réhabilitation des constructions en pisé. Région du Dauphiné. Grenoble, UPAG, 1982.
- Schild, E. L'étanchéité dans l'habitation. Paris, Eyrolles, 1978.
- Schölter, W. Dünner Lehmbauverfahren. In Natur Bauweisen, Berlin, 1948.
- Schultz, K. Adobe craft illustrated manual. Castro Valley, Adobe Craft, 1972.
- Smith, S. La obra de fábrica de ladrillos. Barcelona, Editorial Blume, 1976.
- Sperling, R. Roofs for warm climates. In BRE, Garston, 1974.
- Sructural Engineering Research Center. Houses for economically weaker sections. Madras, SERC.
- Stedman, M. and W. Adobe architecture. Santa Fe, The Sunstone press, 1975.
- Sulzer, H.D.; Meier, T. Economical housing for developing countries. Basel, Prognos, 1978.
- Torraca, G. An international project for the study of mud-brick preservation. 1970.
- Trueba, G. Y Coronel. Systema constructivo "YUYA". Priv. com. México, 1983.
- US/ICOMOS. Recommendations of the US/ICOMOS-ICROM adobe preservation working session, Santa Fe, US/ICOMOS-ICROM, 1977.
- Verwilghen, A. Details of an improved method of traditional wattle and daub construction. Panzi, Verwilghen, 1976.
- Verwilghen, A. Priv. com. Antwerpen, 1984.
- Vita/ITDG. Fourneaux à bois économiques pour faire la cuisine. Mt Rainier, VITA, 1980.
- Volhard, F. Leichtlehmbau. Karlsruhe, CF Müller GmbH, 1983.
- Warren, J. The form life and conservation of mud-brick building. 3rd international symposium on mudbrick (adobe) preservation, Ankara, ICOM-ICOMOS, 1980.
- Wienands, R. Die Lehmarchitektur der Pueblos. Köln, Studio Dumont, 1983.
- Williams-Ellis, C.; Eastwick-Field, J. & E. Building in earth, pisé and stabilized earth. London, Country Life, 1947.
- Wolfskill, L.A. et al. Bâtir en terre. Paris, CRET.
- Yurchenko, P.G. Methods of construction and of heat insulation in the Ukraine. In RIBA journal, London, 1945.

1100 CONSTRUCTIONS PARASINISTRES

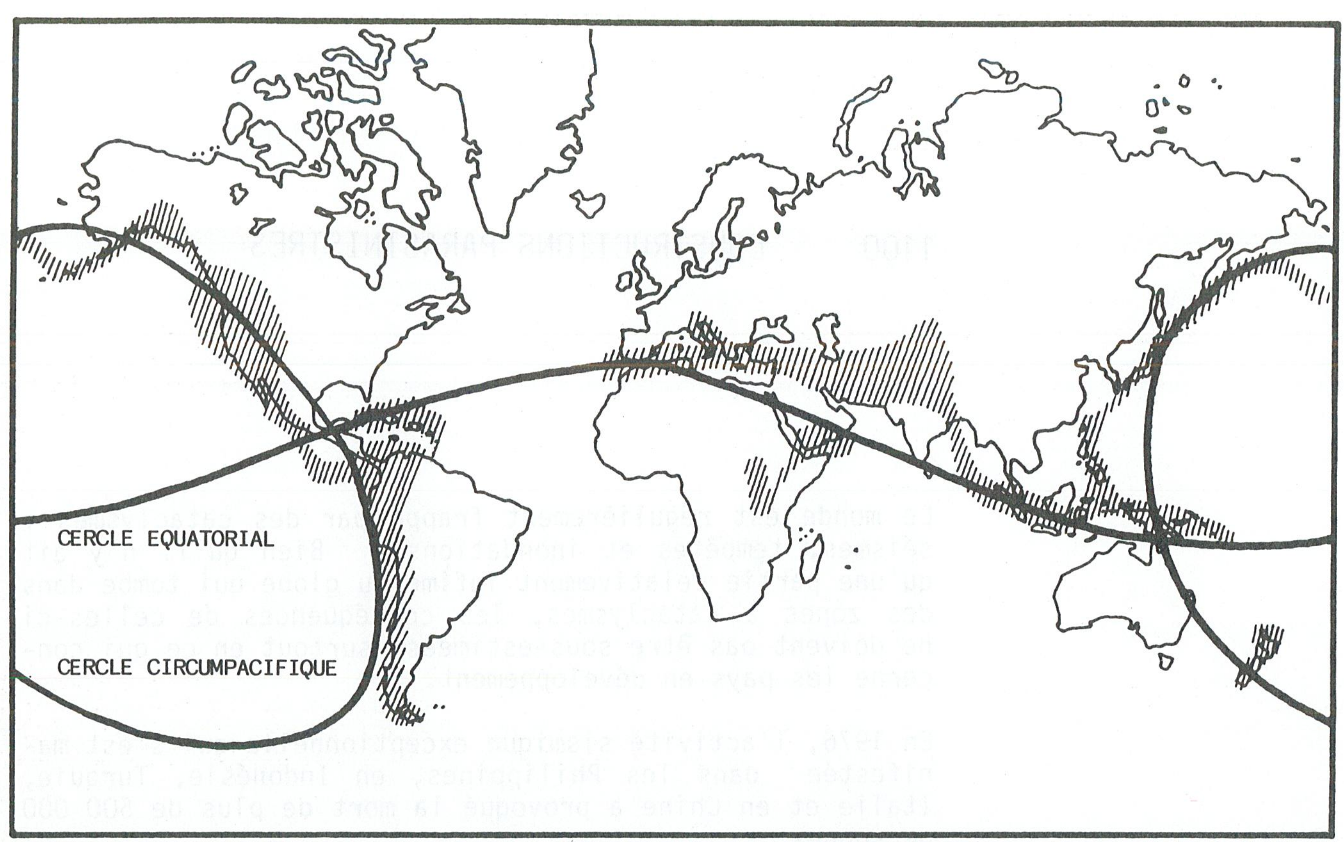
Le monde est régulièrement frappé par des cataclysmes : séismes, tempêtes et inondations. Bien qu'il n'y ait qu'une partie relativement infime du globe qui tombe dans des zones à cataclysmes, les conséquences de celles-ci ne doivent pas être sous-estimées, surtout en ce qui concerne les pays en développement.

En 1976, l'activité sismique exceptionnelle qui s'est manifestée dans les Philippines, en Indonésie, Turquie, Italie et en Chine a provoqué la mort de plus de 500 000 personnes.

Plus de 90 % des morts dus à l'effondrement des maisons, se situent dans des zones d'habitat précaire. La plus grande majorité de ces constructions sont en terre. A une époque où en 30 ans, un énorme progrès a été réalisé dans le domaine de la construction para-sinistres, c'est avec regret que l'on constate la reconstruction dans ces zones sinistrées avec les mêmes méthodes inadéquates. Ceci s'explique par le manque de temps, manque de moyens, mais surtout par le manque d'information.

Une fois de plus dans l'histoire de l'humanité, on doit constater que "les mêmes erreurs se répètent toujours, partout et pendant longtemps". Le fait a été établi que le matériau terre lui-même ne peut être mis en cause. C'est la façon de laquelle on l'a travaillé , mis en oeuvre et employé qui dans presque tous les cas,est responsable de son effondrement. La pratique a prouvé qu'une maison bien construite et bien entretenue peut survivre à la plupart des séismes, qu'elle soit en terre ou tout autre matériau. Ce n'est en effet pas le matériau qui est important, mais la façon de laquelle il est utilisé.

Des améliorations très significatives contre l'effondrement peuvent être obtenues pour une augmentation relativement modérée du coût (à partir de 7 %).



Les continents bougent. La Californie se sépare du reste des U.S.A. et d'ici à 10 millions d'années, l'Afrique et l'Arabie seront sans doute dissociées. L'écorce terrestre est constituée d'une mosaïque de plaques en perpétuelle mouvance, ce que les scientifiques dénomment la tectonique des plaques qui s'opère à l'échelle du globe. En 1980, Harry Hess, de l'Université de Princeton, évoque l'idée d'une expansion des fonds océaniques où serpentent de gigantesques dorsales constituées par les magmas convulsifs du manteau terrestre qui renouvellent la croûte océanique. Aujourd'hui, la géophysique confirme cette théorie et estime la vitesse d'expansion des fonds océaniques de 2 à 18 cm/an. Ainsi, des plaques apparaissent et disparaissent, convergent ou s'écartent, se frôlent ou se chevauchent. Cette mouvance de plaques rigides ne se limite pas aux fonds marins et aux bordures des continents, débordant à l'intérieur des terres, et alimente une activité sismique dévastatrice. La plus forte activité sismique correspond aux cercles circumpacifique et méditerranéen. Le premier longe le littoral occidental du du continent américain, passe par la Nouvelle Zélande, le Japon et une partie du littoral oriental de l'Asie. C'est la zone sismique la plus active du globe avec des séismes de magnitude 7 à 8 sur l'échelle de Richter (Japon) et jusqu'à 8,7 dans la zone andine. L'autre cercle s'étend de la Birmanie aux Açores, se prolongeant en Méditerranée et en Asie Mineure. L'activité sismique y est moindre. Les statistiques globales comptent 100 séismes par an dans le monde de magnitude $\geqslant 6$ et 20 séismes de magnitude $\geqslant 7$. L'année 1976 fut particulièrement meurtrière, causant des centaines de milliers de victimes (Guatemala, Frioul, Tangshan, Maradiye). Mais c'est aussi un énorme tribut économique en constructions et autres biens matériels détruits. Lors d'un séisme, les mouvements ondulatoires du sol, dans le plan vertical comme horizontal, transmettent l'énergie sismique à toutes les constructions qui lui sont solidaires. Lorsque celles-ci ne sont pas aptes à dissiper l'énergie sismique, elles subissent de gros dégâts. Il suffirait pourtant d'augmenter de 2 à 7 % le coût des constructions de bonne qualité pour améliorer leur résistance. Ce coût est hélas plus élevé pour les constructions rurales de basse qualité.

MECANISMES DE DESTRUCTION

Les séismes sont caractérisés par des secousses imprimées au sol. Ce sont des vibrations plus ou moins aléatoires, notamment à l'épicentre des séismes. Leur accélération, leur vitesse et leur intensité maximales dépendent de la profondeur du foyer sismique et de la géologie du lieu. Ces vibrations s'affaiblissent rapidement, en moins d'une minute, mais peuvent être répétitives, pendant plusieurs heures. Les principaux mécanismes de destruction sismiques sont donc les secousses elles-mêmes et les mécanismes afférents : effondrement, impact de masses transportées, inondation, incendie.

1 - LES SECOUSSES

C'est de loin, le mécanisme destructeur le plus dangereux. Les secousses affectent le terrain et les fondations des constructions. Les immeubles sont ébranlés et les objets tombent; les constructions sont renversées en tout ou partie.

2 - EFFONDREMENT

Les séismes provoquent de violentes ondulations et des tassements différentiels du sol, des glissements de terrain, une liquéfaction du sol, un coulissage du sol le long des failles. Ces mécanismes éprouvent durement les fondations et les structures des édifices qui sont emportées et s'effondrent. En construisant à l'écart des failles localisées par les géologues, de tels risques peuvent être amoindris.

3 - IMPACT DE MASSES TRANSPORTEES

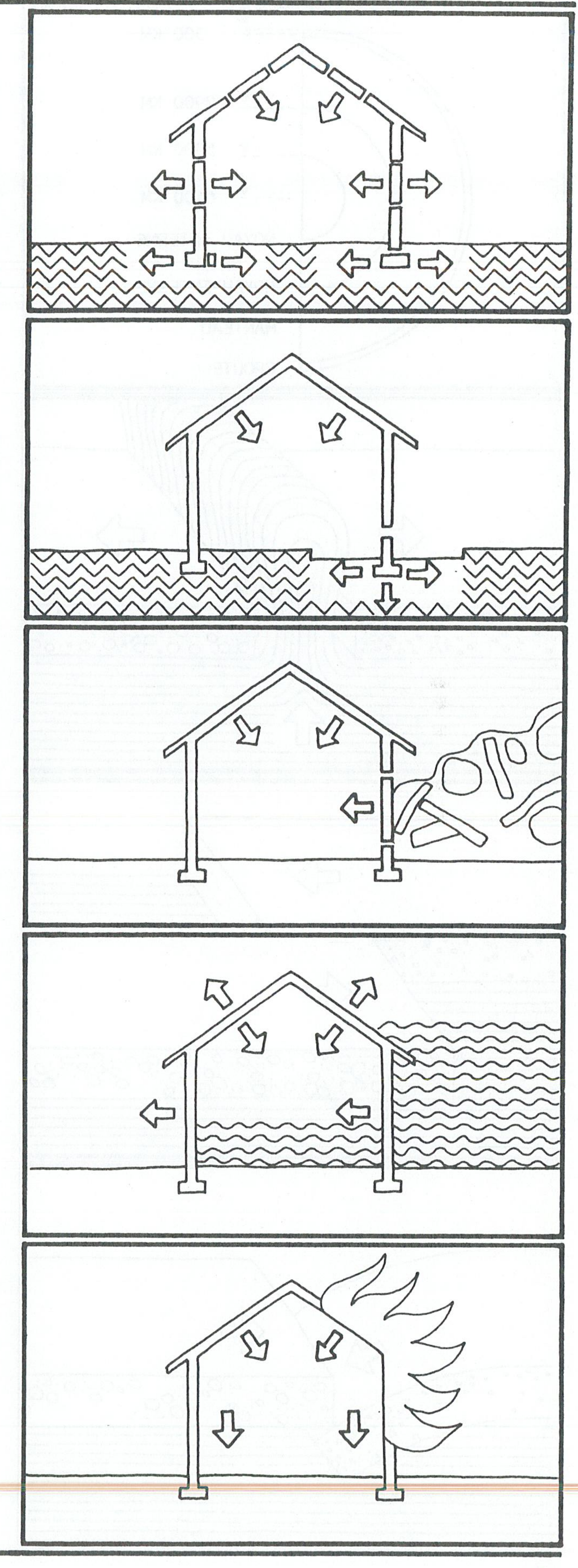
Les constructions peuvent être endommagées, voire renversées par l'impact de masses telles que coulées de boue ou avalanches de terrain, arbres déracinés, rochers ou objets lourds transportés, constructions voisines effondrées. Ces masses peuvent ensevelir les constructions.

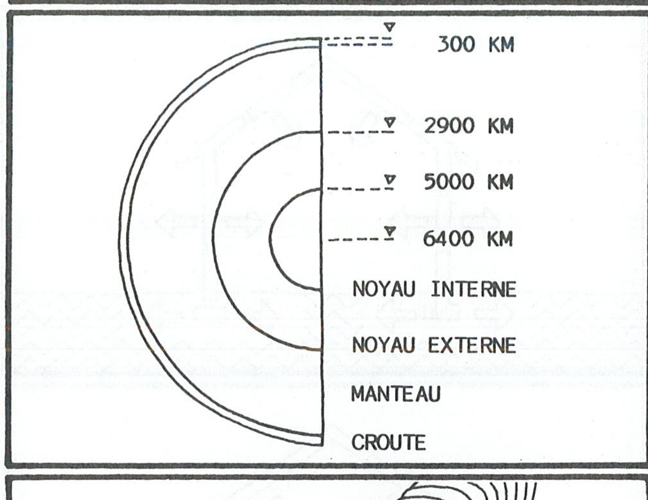
4 - INONDATIONS

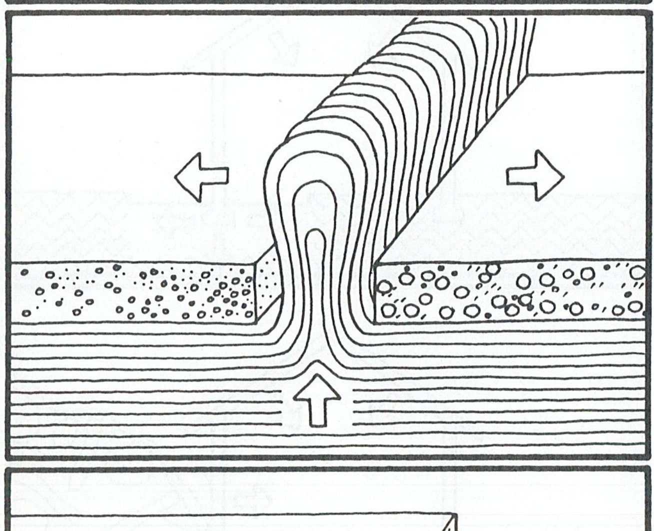
En bordure des océans, les tsunamis (raz de marée) peuvent causer davantage de dégâts que les secousses elles-mêmes. Des ruptures de barrages peuvent également provoquer des inondations dévastatrices.

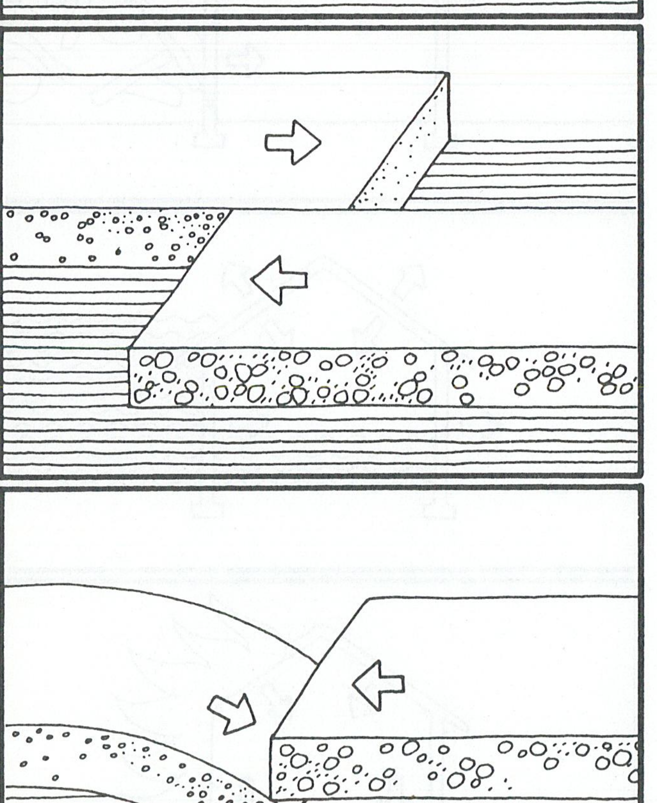
5 - INCENDIES

Des courts-circuits, des ruptures de conduites de produits inflammables, des chaudières ou des foyers renversés alimentent des incendies. La destruction des réserves d'eau et des réseaux de distribution, des accès de service, gêne la lutte contre les incendies qui sont aggravés.









ORIGINES

Notre planète est constituée de quatre couches concentriques. Celles-ci se déforment du fait d'un remaniement géologique permanent qui alimente l'activité sismique. Cette origine naturelle des séismes est doublée d'une origine artificielle due au remaniement de notre planète par l'activité humaine. On distingue quatre origines majeures de séismes :

1 - SEISMES D'EXPLOSION

La détonation d'une explosion chimique ou nucléaire sous-terraine dégage une grosse quantité d'énergie : création d'une cavité et propagation d'ondes sismiques dans toutes les directions.

2 - SEISMES D'EFFONDREMENT

Dans le sous-sol, l'effondrement des cavernes ou des mines produit des ondes sismiques. Des séismes d'effondrement sont aussi dûs à un glissement de terrain, à un tassement excessif du sous-sol du fait de l'énorme pression de retenues d'eau - barrages.

3 - SEISMES VOLCANIQUES

Ils accompagnent souvent l'activité volcanique. La production des ondes sismiques est similaire à celle des séismes tectoniques.

4 - SEISMES TECTONIQUES

Ce sont les séismes les plus communs et les plus dévastateurs. Les plaques constituant l'écorce terrestre se déforment. Des fractures libèrent l'énergie accumulée lors du processus de déformation. On distingue trois mécanismes majeurs de mouvement de plaques :

- La séparation : dans les fonds océaniques, le long des zones de fracture, deux plaques se séparent: le magma du manteau surgit, refroidit, forme une dorsale dans l'axe de laquelle se produisent des séismes.

- Le coulissement : deux plaques coulissent l'une contre l'autre, sans se rompre. Ce sont des failles en transformation telle la faille de San Andreas en Californie où s'opère un glissement entre les plaques d'Amérique du Nord et du Pacifique.

- Le chevauchement : dans les zones de grande activité sismique, deux plaques se chevauchent, l'une s'enfonçant et retournant au magma par les fosses existantes. De violents séismes accompagnent ce phénomène : cas de la zone andine où les plaques Sud Pacifique et américaine sont en contact.

MECANISMES : LES ONDES

Dans un matériau élastique,un choc brutal engendre un tremblement lié à la propagation d'ondes. On distingue deux classes d'ondes sismiques : les ondes de volume dont l'onde "P" et l'onde "S" et les ondes de surface dont l'onde "Love" et l'onde "Rayleigh".

1 - LES ONDES DE VOLUME

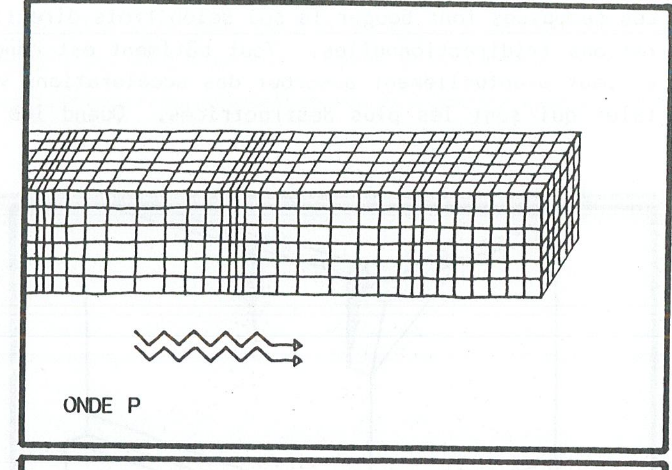
- L'onde "P" ou onde primaire se propage à l'égal des ondes sonores, elle comprime et dilate tour à tour les roches. C'est la plus rapide des ondes de volume; sa vitesse peut varier de 5 km/seconde en surface à 135 km/seconde pour une profondeur de 2 900 km. L'onde "P" se propage à la fois dans les milieux liquide (sensible en mer) et solide et peut être multidirectionnelle. Ses accélérations verticales peuvent être supérieures à celles de la pesanteur et provoquer des projections verticales.

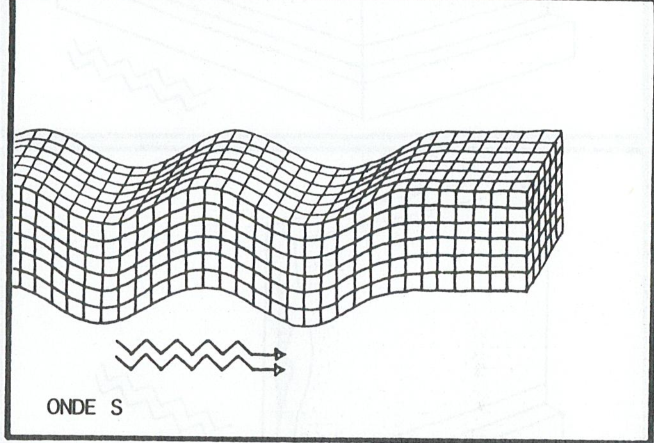
- L'onde "S" ou secondaire vient aussitôt après "P". Elle n'affecte que le milieu solide et cisaille les roches dans une direction normale à sa propagation. L'onde "S" est moins rapide que "P" mais ses mouvements de bas en haut et de droite à gauche qui secouent la surface dans le sens horizontal et vertical sont les plus dévastateurs. "P" et "S" sont réfléchies et réfractées par les plans de clivage de deux couches de roches différentes. En atteignant la surface, beaucoup de l'énergie de ces ondes est réfléchie vers l'intérieur de la croûte terrestre : il se produit une amplification des secousses due à la simultanéité des ondes montantes et descendantes qui aggrave les dégâts.

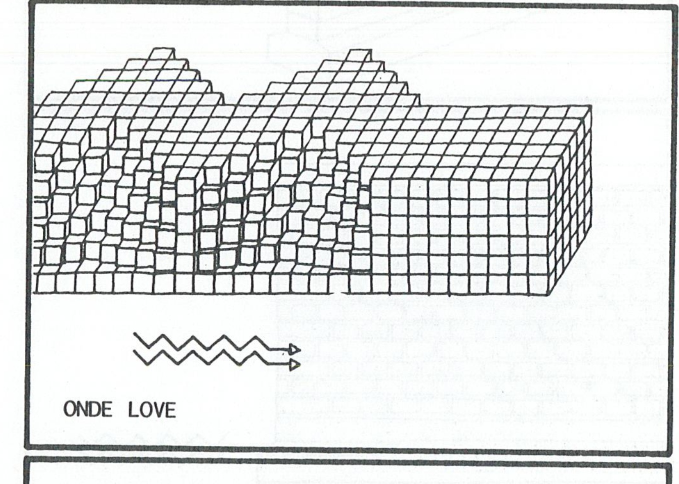
2 - LES ONDES DE SURFACE

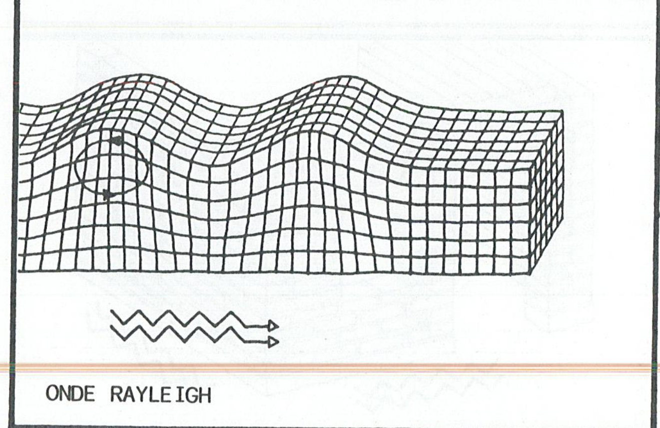
Elles sont plus lentes que les ondes de volume et se propagent au voisinage de la surface du sol. Les ondes de "Love" se déplacent à l'égal des ondes "S" sans mouvement vertical. Elles ébranlent le sol horizontalement et affectent les fondations des édifices. Les ondes de "Rayleigh" déplacent le sol dans le sens vertical et horizontal, dans un plan vertical parallèle à leur propagation. A leur passage, la roche se déplace le long d'une ellipse.

Les secousses du sol sont donc dues à l'action mélangée des ondes sismiques évoquées et le rayonnement diffus de l'énergie à partir du foyer du séisme affecte le sol de façon très complexe.

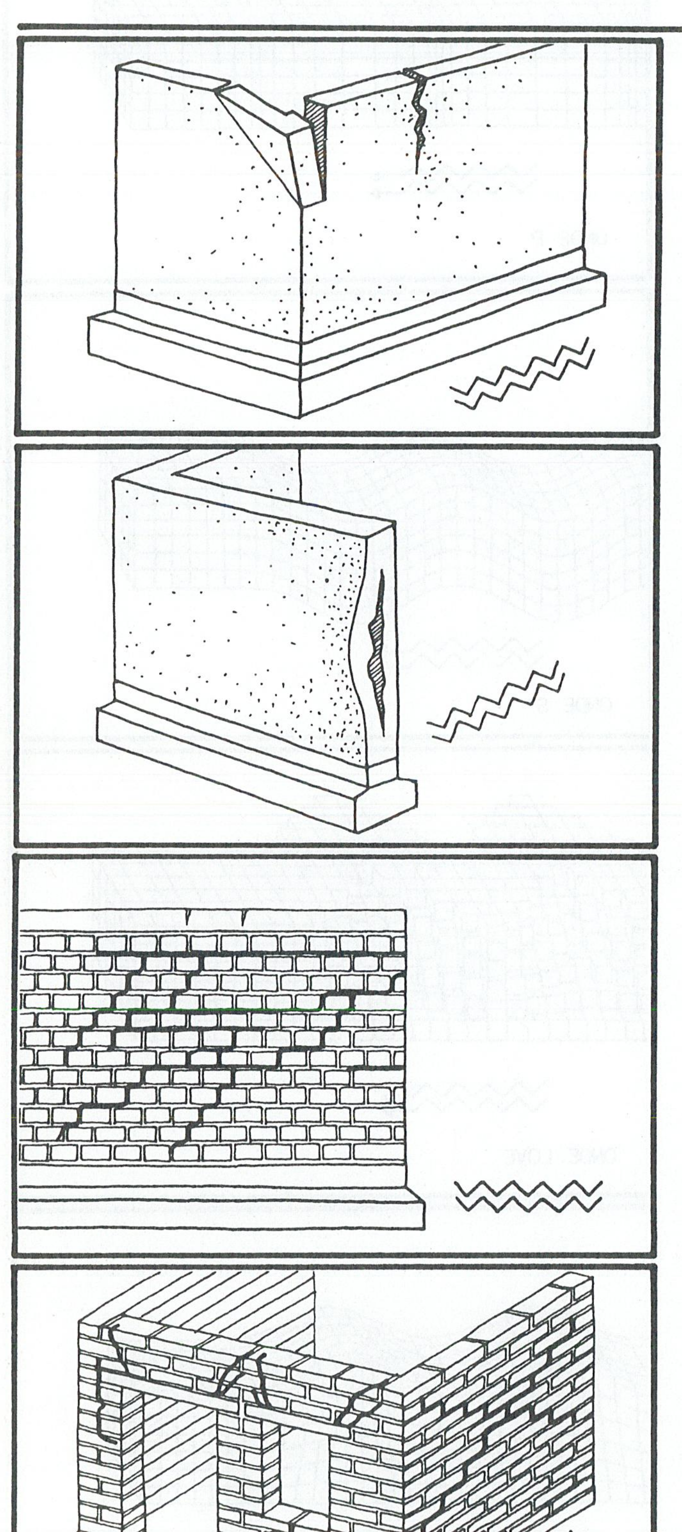








Les secousses font bouger le sol selon trois directions majeures et les bâtiments subissent des accélérations tridirectionnelles. Tout bâtiment est conçu pour résister à des forces verticales de gravité et peut éventuellement absorber des accélérations verticales. Mais ce sont les accélérations horizontales qui sont les plus destructrices. Quand les fondations bougent horizontalement avec le sol, la



1 - MANQUE DE RESISTANCE A LA TRACTION

Les constructions en terre n'offrent que peu de résistance à la traction. De plus, une mauvaise adhérence entre le mortier et les blocs d'adobe ou comprimés affaiblit les constructions.

- Une fissure proche de l'angle d'un bâtiment, due à un effort de traction directement exercé sur l'un des murs affaiblit cet angle. Par un effet de coup de bélier à la jonction des deux murs, un fragment d'angle se détache et ôte un support précieux à la toiture.
- Le manque de résistance à la traction se manifeste aussi par l'éclatement des murs dans leur épaisseur. Sur une situation d'appareil défectueux des blocs, les forces de traction peuvent cliver le mur en deux couches verticales qui se désolidarisent et causent l'écroulement du mur.

2 - MANQUE DE RESISTANCE AU CISAILLEMENT

Les efforts tangentiels exercés sur les joints horizontaux provoquent des fissures typiques qui admettent une direction à 45°. Le manque d'adhérence du mortier favorise le phénomène. Ces fissures à 45° cherchent de préférence passage par les points faibles : les joints entre le mortier et les briques. Du fait de la propagation complexe des ondes sismiques dans toutes les directions, ces fissures peuvent se croiser dans les deux sens et le phénomène est considérablement aggravé lorsque le mur est percé d'ouvertures : écroulement de parties telles que trumeaux, allèges ou impostes. Il semble que le comportement des murs en blocs appareillés soit meilleur quand on emploie des blocs et un mortier de même nature et de même résistance. Dans ce cas, on observe un moindre délitage.

partie supérieure de l'édifice réagit par inertie avec un léger délai qui est à l'origine des dégâts typiques. Les contraintes exercées sont proportionnelles à la masse et affectent davantage les constructions lourdes et celles qui ne peuvent absorber les forces latérales. Ainsi est-il préférable, en zone sismique, d'élever des structures et notamment des toitures légères.

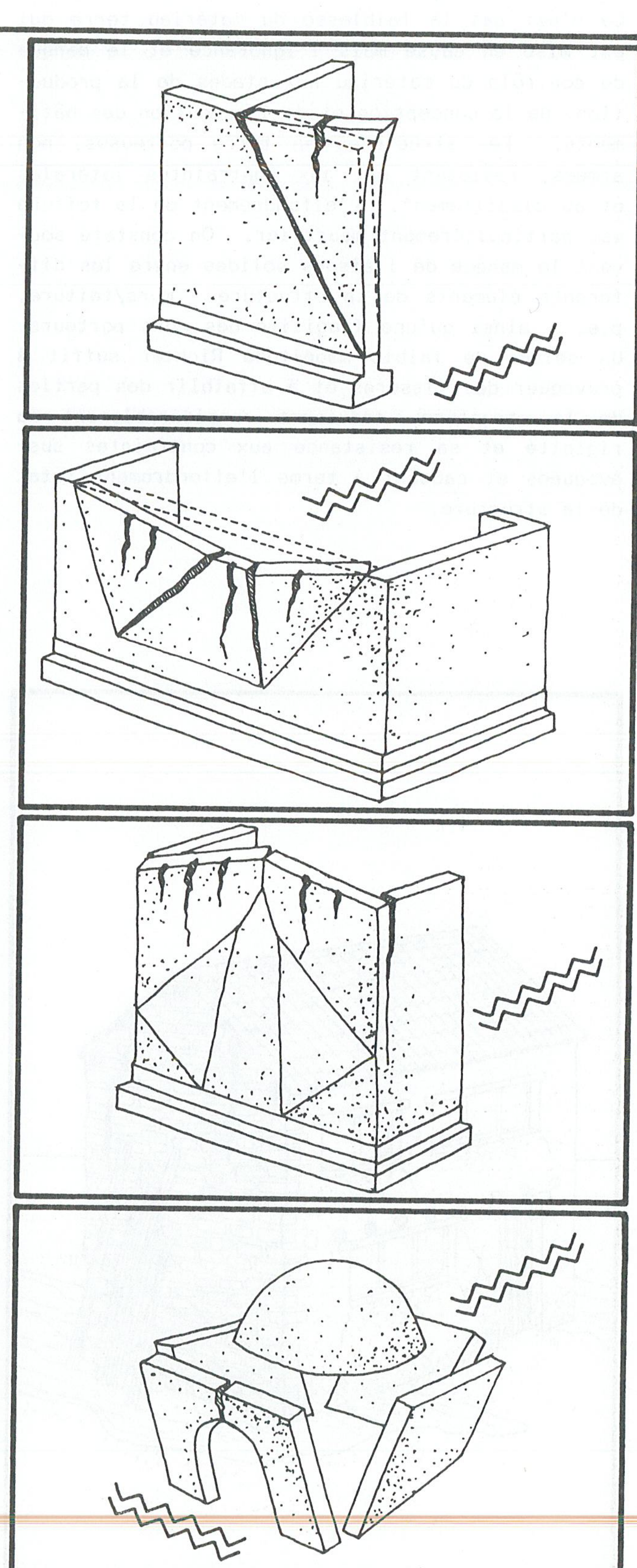
3 - MANQUE DE RESISTANCE A LA FLEXION

Des fissures typiques sont dues à l'effet cumulé des efforts de traction et de flexion. Sur un mur qui se comporte comme une dalle appuyée en sa base (fondations) et contre un élément vertical (poteau ou refend), la fissure typique peut courir dans une direction verticale, horizontale ou oblique.

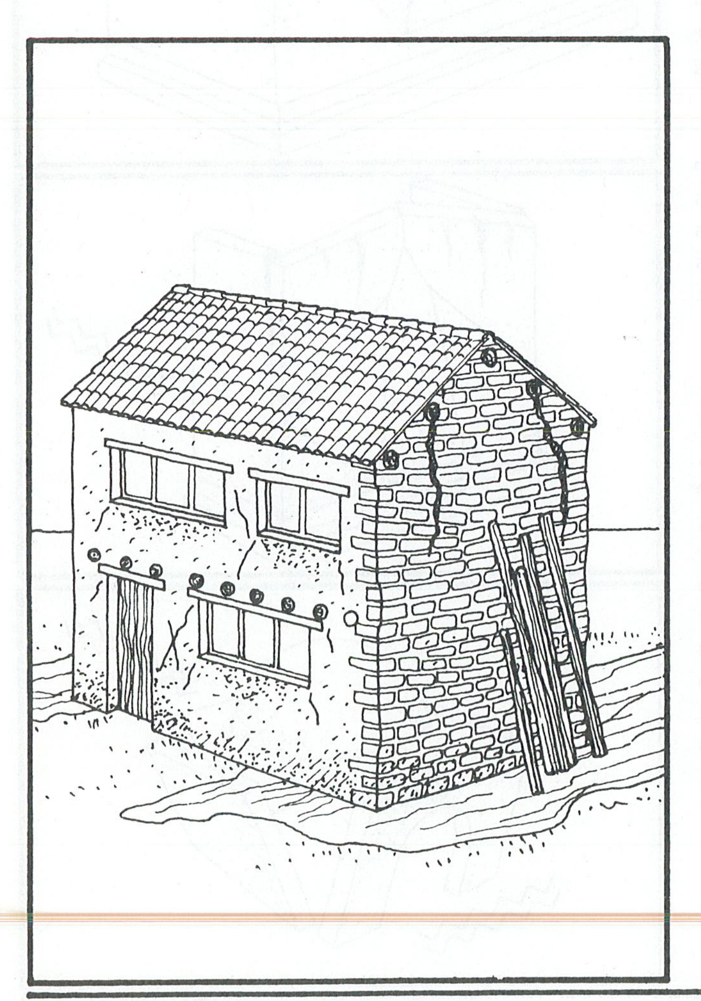
Sur des murs longs, les vibrations exercent des efforts perpendiculaires à la surface du mur et les contraintes sont maximales aux extrémités du mur. On observe des fissures verticales partant du sommet du mur et des fissures obliques partant des angles et du centre du panneau. La partie supérieure du mur agit en cantilever par rapport à la base. Les moments de torsion à la base deviennent plus critiques lorsque les fissures s'agrandissent causant un flambement et un éclatement du mur vers l'extérieur (en général). Les toitures s'écroulent.

Pour des murs courts, la rigidité de la liaison murs/toiture réduit la contrainte de flexion mais la faible résistance à la traction affecte les côtés des murs à leur jonction avec les autres murs. L'éclatement des murs s'opère généralement en direction de l'intérieur du bâtiment.

C'est l'écroulement des toitures qui est l'avatar le plus meurtrier surtout lorsqu'elles sont lourdes. Lorsque le toit agit en poussée sur les murs, leur écroulement est assuré. Les maisons en adobe sont parfois couvertes de dômes ou de voûtes. La poussée latérale de la voûte est reprise par les murs porteurs. Lors des secousses, la poussée statique latérale est amplifiée par des forces dynamiques : les murs bougent, s'écroulent vers l'extérieur et la voûte s'effondre. Un chaînage à la base du dôme ou de la voûte limite fortement les dégâts. Pour des toitures supportées par des poutres en simple appui, la faiblesse de l'appui est à l'origine de l'effondrement.



La pathologie des bâtiments en terre affectés par les séismes démontre que les dégâts typiques et les conséquences tragiques sont pour beaucoup dus à l'emploi de mauvais matériaux, à une mise en oeuvre peu soignée et à un entretien déficient. Ce n'est pas la faiblesse du matériau terre qui est mise en cause mais l'ignorance et le manque de contrôle du matériau aux stades de la production, de la conception et de l'exécution des bâtiments. Les structures en terre porteuses, non armées, résistent mal aux contraintes latérales et au cisaillement. L'effondrement de la toiture est particulièrement meurtrier. On constate souvent le manque de liaisons solides entre les différents éléments de la structure - murs/toiture, p.e. - ainsi qu'une fragilité des murs porteurs. Un séisme de faible magnitude Richter suffit à provoquer des fissures et à affaiblir des parties de la structure, réduisant considérablement sa rigidité et sa résistance aux contraintes susévoquées et causant à terme l'effondrement total de la structure.



ANALYSE PATHOLOGIQUE

1 - ENVIRONNEMENT

Les constructions sinistrées sont le plus souvent implantées sur des terrains à haut risque sismique et il y a souvent discordance entre la rigidité des constructions en adobe, en blocs ou en pisé - même bien conçues - et la nature des sols. Il convient d'éviter les sites pentus et instables, le voisinage de falaises, les terrains de dépôt ou rapportés par l'homme car ils sont sujets à des risques de glissement de terrain, d'éboulement, de tassement ou de liquéfaction. Sur des terrains affouillés par des cours d'eau ou par des travaux (routes, constructions), le risque est augmenté. Les sols de dépôt alluvionnaire saturés d'eau (fortes pluies, nappe phréatique) sont exposés à des éboulements (pentes) ou à une liquéfaction (sites plats). Ces sols ainsi que ceux de type organique, peu profonds, sont sujets à des vibrations de haute fréquence très supérieures à celles éprouvées par des terrains rocheux. On admet que les sites de pente supérieure à 35° ou ravinés sont à éviter; de même que les sites de crêtes car il y a amplification des secousses et risque de glissement de terrain.
Il faut aussi considérer la nature du sous-sol car des couches profondes d'argiles instables ou de sables saturés peuvent compromettre la stabilité des couches supérieures. En règle générale, il est préférable de construire sur le roc pour une meilleure stabilité des fondations.

2 - MATERIAU

Le choix d'une terre de mauvaise qualité aggrave la pathologie sismique des constructions. Des erreurs majeures sont commises lors de la préparation du matériau : mélange de terre et de paille mal dosé ou non homogène pour réaliser un torchis ou des adobes; trop d'eau pour la mise en oeuvre, etc... lors de l'ajoute d'un stabilisant - ciment, chaux, asphalte - dosage incorrect, pas de contrôle de la teneur en eau pour un compactage optimal (blocs comprimés, B.T.S.). La forme des matériaux n'est pas correcte : adobes de forme grossière, trop lourdes et épaisses ou trop petites, épaisses et minces. Les briques épaisses concentrent les contraintes sur les joints.

3 - FONDATIONS

La construction est fondée sur un sol instable et le système n'est pas adapté, semelles non armées : tassement et fissurations; absence de fondations ou profondeur insuffisante (non respect

de la limite hors gel),emploi de mauvais matériaux ou mauvaise exécution. On ne relève pas assez le rôle important des fondations comme protection contre l'humidité (remontées capillaires): absence de drainage ou de protection étanche.

4 - MURS

Plusieurs causes d'écroulement des murs :

- Construction à la saison des pluies, sans protection. Emploi de briques grossières, pas assez sèches.
- Main d'oeuvre peu qualifiée, exécution peu soignée : mauvais mortier, mal dosé ou trop liquide (fort retrait hydraulique et manque d'adhérence), pas de bourrage des joints verticaux, couches trop minces ou trop épaisses, appareil mal calepiné (joints non décalés), mauvais aplomb. Construction trop rapide (+ de 1 m/jour) : tassement des lits inférieurs.
- Pas de liaison entre fondations et murs, pas de soubassement protégeant contre l'humidité : minage de la base des murs.
- Non respect des rapports d'épaisseur/hauteur (1/12) et de hauteur/longueur (½). Construction de plus d'un étage.
- Trop grande distance entre piliers porteurs, refends et contreforts, contreventement mal exécuté. Murs en remplissage par portions de panneaux séparés et non solidarisés.
- Mauvaise liaison des murs aux angles (non renforcés) ou avec les refends.
- Pas d'armatures horizontales.
- Structure résistant mal aux efforts latéraux, à la traction, à la flexion ou au cisaillement; murs peu ductiles.
- Pas d'ancrage entre murs et précadres d'ouvertures, entre murs et toitures.

5 - OUVERTURES

- La surface totale des ouvertures dans un même mur est trop grande. Le rapport plein/vide doit être inférieur à 3.
- La dimension des baies est excessive, linteaux trop longs.
- La position des baies affaiblit les murs : proximité des angles (au moins 1,20 m) et des toitures, trumeaux étroits.
- Les tableaux de baies sont mal conçus : linteaux et appuis peu encastrés -fissures de cisaillement. Mauvais scellement des précadres : absence de chevilles bois dans l'épaisseur du mur.

6 - CHAINAGES

Absence de chaînage ou discontinuité du chaînage à cause d'une mauvaise exécution des angles et des jonctions entre murs gouttereaux et refends. Pas de chaînage en murs pignons. Pas d'armatures verticales aux angles. Pas de renforts horizontaux inclus aux murs d'adobe (bois, bambou, fers, etc ...).

7 - ENDUITS

Mauvaise protection des murs de terre qui s'imbibent d'eau, enduits mal exécutés et manquant d'adhérence (pas de préparation du support) : voies de dégradation.

8 - TOITURES

Les toitures sont trop lourdes et fragiles. Les charpentes sont mal contreventées (manque de rigidité horizontale) et non ancrées aux murs. Faible encastrement des poutres dans les murs et poussées exercées sur les murs : effondrement de la toiture à l'intérieur de la maison. Charges d'appui des toitures mal réparties, trop concentrées :fissures au droit des descentes de charges. Les observations montrent que les toitures en poutres de petite section résistent mieux que celles en grosse section. Les toitures supportées par un système d'arches en briques (Iran p.e.) sont fragiles : mauvaise reprise des poussées des arcs, effondrement des clés. Les dômes résistent mieux que les voûtes ou que les toits plats. Ces structures pâtissent d'un manque de chaînage et d'ancrage. Les couvertures ne sont pas étanches et les débords de rives insuffisants :dégradation des murs.

9 - ENTRETIEN

Les maisons les plus sinistrées sont souvent celles qui ont été déjà endommagées par un séisme et qui furent mal ou non réparées. Une mauvaise protection contre l'humidité et contre l'attaque des termites et des rongeurs cause un minage de la base des murs et des angles qui affaiblit la structure.

10 - DIVERS

Beaucoup de structures sont affaiblies par l'action des usagers :excès de surcharges d'équipement contre les murs, absence d'entretien des protections extérieures, rajouts de constructions plus rigides que la construction originale.

PRINCIPES D'ACTIONS TECHNIQUES

La sécurité des occupants des constructions établies dans des régions à haut risque sismique demeure la prérogative majeure. Mais, dans le cas d'un habitat très économique, une protection parfaite n'est pas faisable. Force est d'admettre ces limites économiques et de rechercher le moindre dégât et surtout d'empêcher l'effondrement des constructions. A la lumière de ces principes, on peut dégager trois formes d'actions techniques majeures :

1 - S'ASSURER D'UN BON SUPPORT

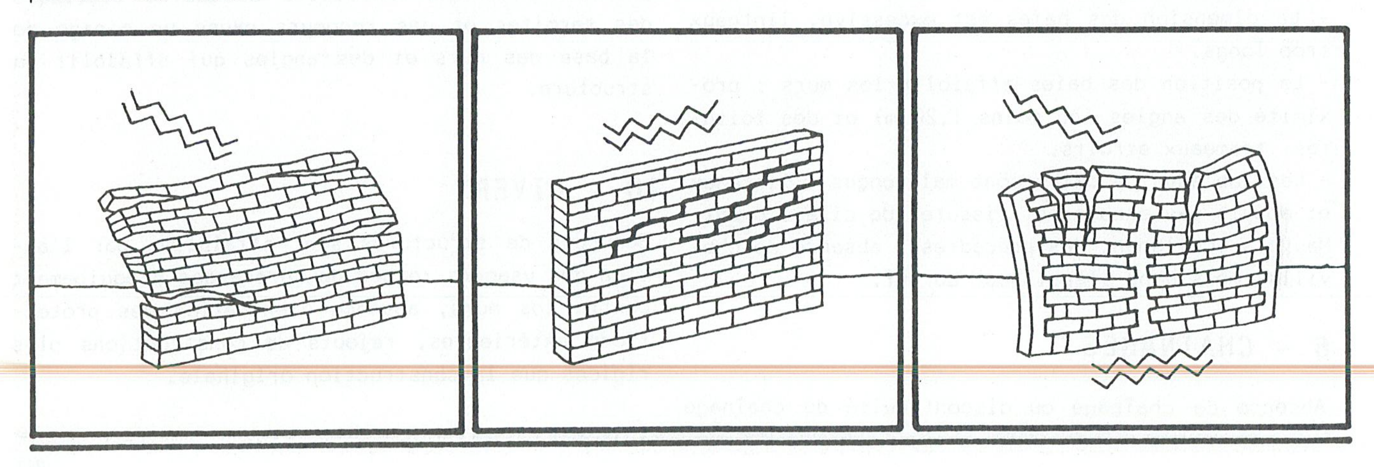
La résistance du sol est fondamentale. Les terrains meubles (alluvionnaire ou de dépôt rapporté) subissent des vibrations sismiques très supérieures à celles éprouvées par des terrains fermes ou rocheux. De même pour les sols sableux, limoneux et argileux saturés d'eau (fortes pluies, proximité de la nappe phréatique) qui peuvent glisser ou se liquéfier. Les sols granuleux peuvent être compactés par les vibrations sismiques et être sujets à des tassements différentiels. Les sols pentus doivent résister au cisaillement. Les constructions ne doivent pas être implantées sur des couches de sols différentes : clivage. Les sites de crête doivent être évités du fait d'une amplification des secousses.

2 - CONSTRUCTION ADAPTEE AU SOL

Sous l'effet des vibrations sismiques, la structure d'une maison et le sol ne doivent pas entrer en "résonnance". Les sols meubles réagissent avec des périodes longues, les sols fermes avec des périodes courtes et les sols rocheux avec des périodes très courtes. Une maison rigide subit des périodes propres courtes et les maisons souples des périodes longues. On comprend donc qu'une maison rigide est moins touchée sur un sol meuble ainsi qu'une maison souple sur un sol ferme ou rocheux.

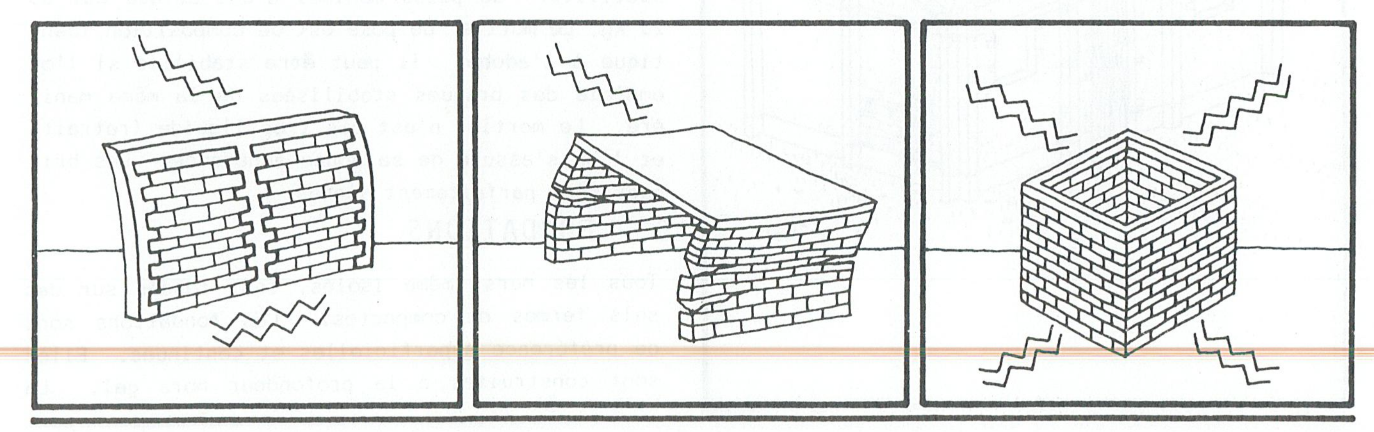
3 - CONSTRUIRE DES STRUCTURES RESISTANTES

La résistance d'une maison à un séisme dépend de sa capacité à transférer les forces appliquées. Il est préférable d'assurer une bonne résistance de l'ensemble de la structure plutôt que de ses éléments isolés. Pour éviter l'effondrement, il importe que la maison soit ductile et hyperstatique. La ductilité permet la déformation sans rupture, elle dépend des types de matériaux employés et des caractéristiques générales de la construction. La ductilité n'est pas requise pour toutes les parties de la construction mais essentiellement pour les parties critiques (fondations, angles, chaînages). Elle permet de réduire le risque de fissures. Lorsque les matériaux sont sollicités au-delà de leur seuil d'élasticité, le comportement hyperstatique permet la formation d'articulations plastiques absorbant l'énergie tout en assurant une stabilité de la structure. Il importe avant tout que la construction soit de conception symétrique afin de résister à la torsion statique et surtout à la torsion dynamique. Il est essentiel de concevoir des structures résistantes dont tous les éléments constructifs - fondations, murs, toitures - sont bien liaisonnés. Les murs lourds en terre doivent être armés dans le plan vertical et horizontal ainsi que les parties fragiles : angles, ouvertures. Cette rigidité assure une résistance aux forces horizontales. Pendant et après les séismes, les planchers et les toitures doivent demeurer monolithiques et assez rigides, les murs porteurs doivent assurer la descente verticale des charges et la structure doit résister aux forces latérales : instabilité latérale due au séisme et poussée des vents.

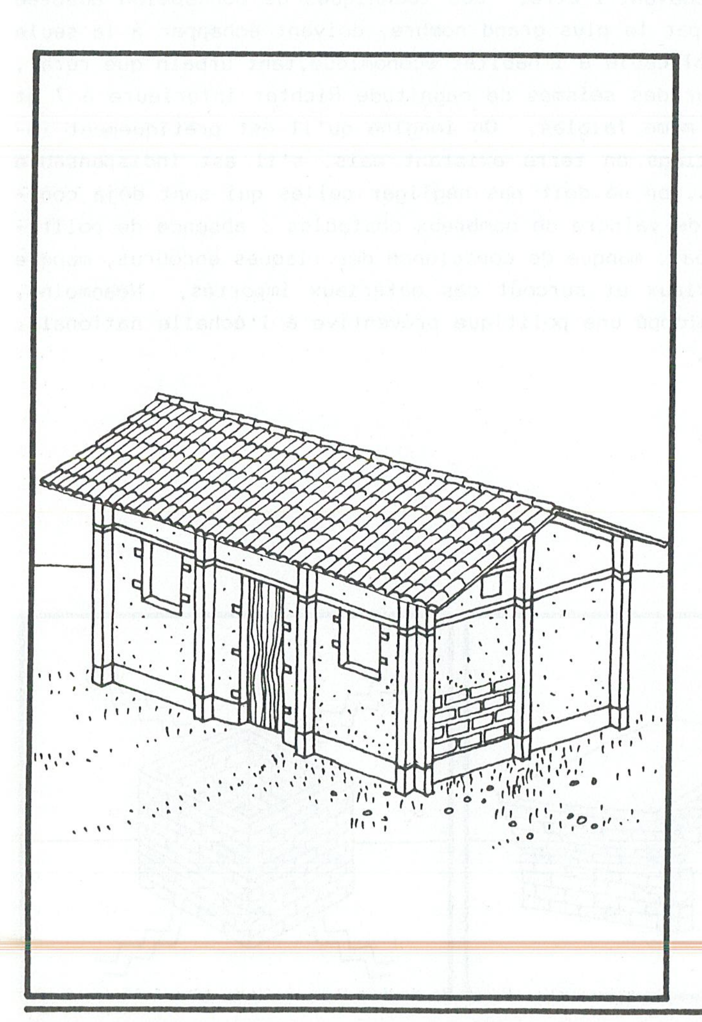


L'EXECUTION DIFFICILE DE CES PRINCIPES D'ACTIONS

Les constructions en terre sont parmi les plus meurtrières (80 % des dommages) mais l'étude de leur résistance aux séismes a très peu polarisé l'attention des chercheurs (5 % des publications). La question est en soi très complexe et l'habitat en terre concerne principalement des régions d'économie de pénurie et le monde rural, et se heurte à des facteurs d'ordre technologique, économique, socio-psychologique et culturel. Les propriétés du matériau sont encore mal connues et le comportement sismique est très variable. Une prise de conscience est néanmoins manifeste par la multiplication des colloques internationaux (Albuquerque 1982, Lima 1983) qui abordent scientifiquement la question. Beaucoup de solutions techniques sont connues et plusieurs recommandations pratiques ont été établies par des experts. On est même allé jusqu'à proposer de remplacer les constructions en terre par des constructions en bois, en acier ou en béton armé, hélas souvent très chères. La proposition de formes résistantes telles que cylindres, cônes, dômes, se heurte à des préjugés culturels. Il est donc encore opportun de s'orienter vers des propositions visant l'amélioration des structures en terre par des solutions de renforcement et d'armatures adaptées. Les solutions connues sont bonnes mais on constate une énorme distance avec leur application réelle. Il conviendrait de s'échapper des laboratoires et de faire appel à davantage de réalisme pratique adapté au contexte d'économie de pénurie et rurale, de développer un réalisme de terrain chez les scientifiques plutôt que de dispenser davantage de science aux praticiens de terrain. Car les recherches et les pratiques de simulation, quoique de pointe, demeurent loin des réalités d'un plateau iranien ou d'un littoral chilien. Il convient également de mieux cerner les buts poursuivis et de limiter les prétentions. Tout d'abord, viser la réduction des pertes en vies humaines et en biens matériels et maîtriser le surcoût d'une conception adaptée aux régions d'économie de pénurie. Supprimer en priorité la possibilité d'un effondrement des constructions et assurer leur entretien par la suite,notamment pour les édifices publics (écoles) et les équipements énergétiques dont la casse prive les populations de ressources indispensables. Il faut développer une véritable politique de prévention et de protection des pays sinistrés ou pouvant l'être. Les techniques de conception adaptée doivent être largement diffusées et assimilables par le plus grand nombre, doivent échapper à la seule théorie. Le critère élémentaire de protection applicable à l'habitat économique,tant urbain que rural, ne doit tolérer aucun dégât structural majeur pour des séismes de magnitude Richter inférieure à 7 et aucun effondrement de toiture pour tous séismes, même faibles. On imagine qu'il est pratiquement impossible d'améliorer l'immense parc de constructions en terre existant mais, s'il est indispensable d'intervenir sur les futures constructions neuves, on ne doit pas négliger celles qui sont déjà construites ou qui doivent être réparées. Il s'agit de vaincre de nombreux obstacles : absence de politique préventive, opposition culturelle, coût très bas, manque de conscience des risques encourus, manque d'éducation, de professionnalisme, de bons matériaux et surcoût des matériaux importés. Néanmoins, le Pérou, la Turquie, le Guatémala, ont déjà développé une politique préventive à l'échelle nationale. L'exemple de ces pays doit être massivement suivi.



Les recommandations anti-sismiques existantes couvrent principalement la brique d'adobe qui est le matériau le plus employé dans la plupart des régions à haut risque sismique. Le pisé est moins employé et les problèmes sont à peu près similaires à ceux de l'adobe. En règle générale, les recommandations utiles à tous travaux de maçonnerie en terre, y compris les ouvrages monolithiques en pisé, bauge ou façonnage direct, doivent se référer pour le moment à celles établies pour l'adobe. Pour les colombages hourdés de terre, les recommandations sont celles établies pour les ouvrages de charpente. Pour les constructions enterrées, très sensibles aux séismes, on ne dispose à ce jour d'aucune information. Il a été prouvé que des constructions en terre bien renforcées résistent à des séismes assez sévères. Les recommandations ne sauraient se substituer aux calculs nécessaires à une bonne conception. Mais on rappellera ici une réflexion sensée : "il est plus sûr de donner une recommandation à 100 personnes plutôt que 100 recommandations à une seule personne."



RECOMMANDATIONS

1 - SITE

En règle générale, on évitera de construire des maisons en terre sur des sols de résistance inférieure à 1 daN/cm². Les matériaux sont stabilisés pour des sols résistants à moins de 2 daN/cm². En absence d'autre alternative, on pourra construire sur des sols résistants à moins de 1 daN/cm² mais on incorporera aux murs de terre des armatures verticales et horizontales qui limitent les déformations.

2 - URBANISME

Si possible, on imposera une distance entre les maisons de 2 fois leur hauteur afin que leur effondrement n'affecte une maison voisine.

3 - PLAN ET FORME

Les plans sont de préférence compacts et de forme carrée ou circulaire. Ils exploitent au maximum la symétrie. Les pièces sont compactes et les portées entre murs sont courtes. On prévoit des murs de refend plutôt que des cloisons. Tous les éléments constructifs sont bien liaisonnés et forment une structure rigide. Les charges du toit sont uniformément réparties sur les murs. On évite la construction à étages. Les plans complexes en L ou en U adoptent la symétrie pour chaque corps de bâtiment qui doivent résister de façon autonome.

4 - MATERIAU

Les adobes sont faites avec une terre peu liquide; leur qualité est régulièrement vérifiée : non déformées au démoulage et arêtes vives. Elles sont parallélépipèdiques et peu épaisses. Leur longueur n'excède pas 2 fois leur largeur plus l'épaisseur d'un joint vertical. Leur hauteur n'excède pas 10 cm. Il est préférable de multiplier les lits de pose sur la hauteur d'un mur pour une meilleure ductilité. Le poids maximal d'une brique est de 23 kg. Le mortier de pose est de composition identique à l'adobe; il peut être stabilisé si l'on emploie des briques stabilisées de la même manière. Le mortier n'est pas trop liquide (retrait) et l'on s'assure de sa bonne adhérence. Les briques sont parfaitement sèches.

5 - FONDATIONS

Tous les murs, même isolés, sont fondés sur des sols fermes et compactes. Les fondations sont de préférence superficielles et continues. Elles sont construites à la profondeur hors gel. La

dimension des fondations doit assumer une pression de contact au sol inférieure à la pression admissible : ≃ 1,5 fois l'épaisseur du mur. Les fondations agissent comme un anneau rigide et sont reliées verticalement aux murs et aux chaînages. Une protection étanche est prévue ainsi qu'une arase sanitaire à la base des murs. Les fondations sont surhaussées d'un soubassement protégeant les murs contre l'humidité.

6 - MISE EN OEUVRE

On élève pas plus de 1 mètre de mur d'adobe par jour pour éviter le tassement différentiel de la base. Les lits de briques sont dressés avec un parfait aplomb et de niveau suivant le contour total de la maison. Les joints verticaux sont bien décalés et le mortier est appliqué avant la pose de la brique suivante. L'épaisseur des joints n'est pas supérieure à 2 cm et d'au moins 1 cm. Les briques sont humidifiées pour une bonne adhérence du mortier.

7 - MURS

L'épaisseur des murs de maçonnerie est d'au moins 30 cm. Leur hauteur n'excède pas 8 fois leur épaisseur; 2,40 m est une mesure préférentielle et l'on ne dépassera pas 3 m entre deux chaînages horizontaux. Aucun pan de mur ne doit avoir plus de 4 m de long sauf où l'on bâti des chaînages verticaux ou des contreforts(en saillie d'au moins 30 cm). Les liaisons de murs sont parfaitement orthogonales. Les angles et les liaisons de murs sont armés verticalement ou renforcés de contreforts qui sont liés aux murs et munis de fondations. Des armatures horizontales (bambous, fers, etc...) sont disposées tous les 4 ou 6 rangs de briques et noyées dans le mortier. Des renforts verticaux peuvent être disposés toutes les 2 ou 4 briques. Les murs sont protégés contre l'érosion.

8 - OUVERTURES

La surface totale des baies dans un mur n'excède pas 40 % de la surface du mur. Leur largeur n'excède pas 35 % de la longueur du mur; un maximum de 1,20 m est préférable. La largeur d'un pan de mur entre deux baies n'est pas inférieure à 90 cm. Les baies sont disposées à au moins 1,20 m des angles et à au moins 50 cm des liaisons de murs. Elles sont munies de tableaux renforcés et sont réparties dans les murs, disposées en symétrie.

9 - LINTEAUX

Les linteaux sont de l'épaisseur du mur et de hauteur minimale équivalente à un lit d'adobe. Ils sont encastrés dans le mur d'au moins 50 cm et sont surmontés d'un maximum de trois rangs d'adobe puis déchargés par un chaînage horizontal. Si les linteaux sont faits en plusieurs éléments, ceux-ci sont solidarisés.

10 - RENFORTS D'ANGLES

Aux angles et aux liaisons de murs extérieurs et intérieurs, les briques sont correctement harpées. Des renforts horizontaux (bois ou acier) sont placés tous les 3 ou 4 lits d'adobes et pénètrent dans les murs sur au moins 1 m. Les renforts verticaux sont solidarisés aux fondations et aux chaînages. Aux angles, des systèmes d'équerres ou de nappes de bois parallèles peuvent être employés.

11 - CHAINAGE HORIZONTAL

Les murs sont couronnés d'un chaînage continu, très résistant à la traction, en béton armé, bois ouvragé, fer, bambou, etc. Le chaînage donne une cohésion aux derniers rangs d'adobes peu chargés et répartit les charges du toit. Il correspond de préférence aux linteaux des baies. Aux angles, le chaînage est renforcé. Des tirants liés au chaînage peuvent relier les angles diamétralement opposés pour améliorer la résistance à la torsion de la maison.

12 - TOITURES

Les toitures sont adaptées aux climats locaux et le plus légères possible. Les toits plats en terre très lourds, sont à éviter dans les zones à haut risque sismique. Le toit à 4 pans est celui qui répartit le mieux les charges. Les pentes sont réduites pour limiter la poussée sur les murs. Les charpentes sont bien contreventées et appuyées sur un chaînage, ancrées aux murs. Les poutres sont bien encastrées et non appuyées sur les linteaux. Les coupoles et les voûtes sont chaînées à leur base. La longueur des voûtes n'excède pas 2 fois leur largeur; elles ne sont pas appuyées contre les murs mais terminées en cul-de-four. Des contreforts reprennent leur poussée.

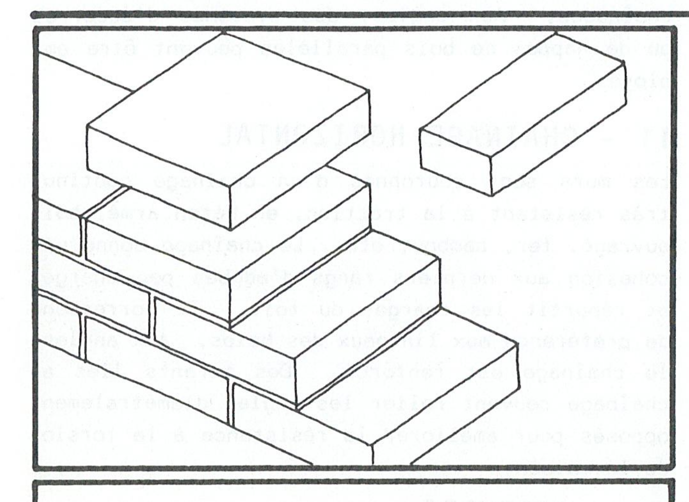
13 - ENDUITS

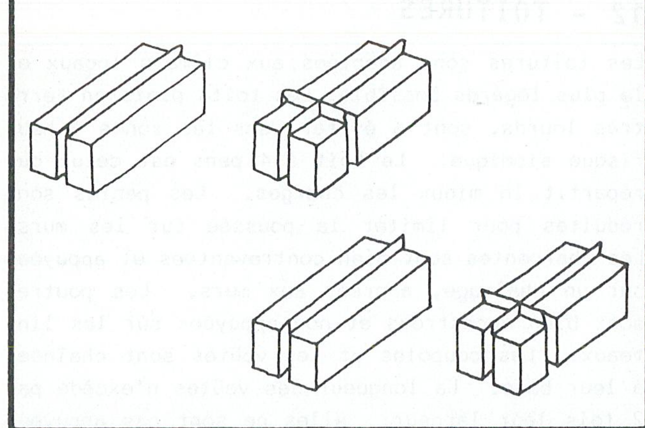
L'enduit grillagé crée une enveloppe armée qui protège les murs du délabrement.

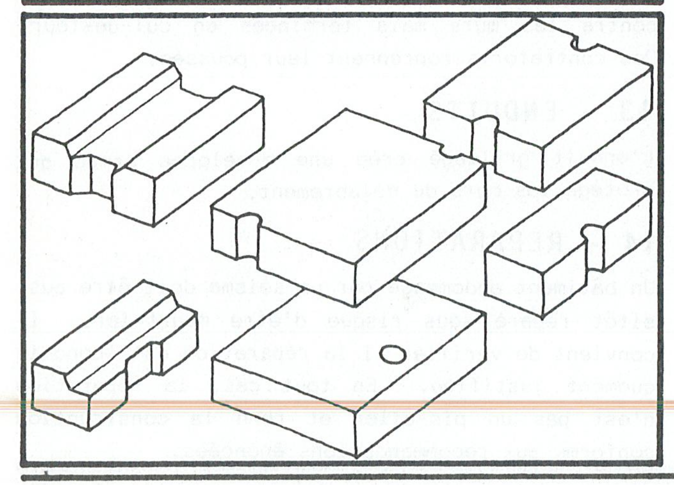
14 - REPARATIONS

Un bâtiment endommagé par un séisme doit être aussitôt réparé sous risque d'être meurtrier. Il convient de vérifier si la réparation est économiquement justifiée. En tout cas, la réparation n'est pas un pis-aller et rend la construction conforme aux recommandations énoncées.

L'amélioration de la résistance aux séismes des constructions en terre implique l'adoption de pratiques de construction adaptées. Ces pratiques relèvent d'une part de la maçonnerie monolithique courante mais aussi de pratiques spécifiques au matériau terre. Divers organismes de recherche ont mis au point ces recommandations pratiques en s'efforçant d'une part d'améliorer les techniques de maçonnerie pour obtenir des murs parfaitement appareillés et le plus monolithiques possible et d'autre part en visant une plus grande ductilité des murs de terre. L'amélioration du matériau et des techniques de mise en oeuvre a primé sur la surprotection du matériau. Malheureusement, les recommandations ne sont pas expérimentées massivement et l'on gage qu'il faudra encore beaucoup de temps avant que leur application soit généralisée aux zones à haut risque sismique. Et pourtant, c'est par cette application massive des recommandations parasismiques propres au matériau terre et très souvent de quelques règles élémentaires que l'on pourra éviter une grande partie des dommages.







1 - BRIQUES D'ADOBE CARREES

Les dimensions de travail les plus appropriées, ajoutées de 2 cm d'épaisseur de mortier sont : L = 40 cm, l = 38 cm, h = 10 cm. Le poids des adobes varie de 14 à 19 kg selon la quantité de paille (de 1200 à 1600 kg/m³). Ces dimensions donnent des solutions d'appareil multiples et aisées mais exigent des plans parfaitement calepinés. Les adobes sont de meilleure qualité si elles sont fabriquées selon la méthode du "coup de sable" : moins d'eau. L'augmentation du volume de paille réduit le poids et améliore la ductilité.

2 - BRIQUES AUTOBLOQUANTES

Ce sont pour l'essentiel des briques comprimées, stabilisées, produites à l'aide des presses les plus simples. La finition doit être parfaite pour assurer un bon emboîtement et empêcher toute infiltration du vent et de l'eau de pluie. Au Mexique, sur la côte Sud-Ouest du Pacifique, une maison rurale de plain-pied, en murs autoporteurs sans mortier, a été construite selon ce principe; près de Mexico, un bâtiment de 4 étages avec structure en béton armé, également sans mortier. Ces bâtiments ont déjà résisté à plusieurs séismes importants. Ces solutions montrent qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un matériau ductile pour avoir une construction ductile. Ces techniques méritent d'être développées malgré les problèmes inhérents à la production, au stockage et à la manipulation.

3 - BRIQUES POUR MACONNERIE ARMEE

Des briques ordinaires peuvent être employées mais posent des problèmes de mise en oeuvre. Il est préférable d'employer des briques avec réservations permettant la pose des armatures dans le sens horizontal et vertical. Les plus sophistiquées sont fabriquées avec des presses mais on peut aussi les fabriquer comme des adobes.

4 - MORTIER

La qualité du mortier et de la pose accroît la résistance des murs aux séismes. L'emploi d'un mortier stabilisé, pratique peu courante en milieu rural, peut doubler la résistance au cisaillement. L'absence de joints verticaux diminue de 20 à 50 % la résistance à la compression du mur et supprime toute résistance à la flexion et au cisaillement. L'emploi d'un mortier trop liquide - retrait et manque d'adhérence - est à proscrire. La stabilisation du mortier peut doubler la friction du mortier et quadrupler son adhérence à la brique.

5 - APPAREILLAGE

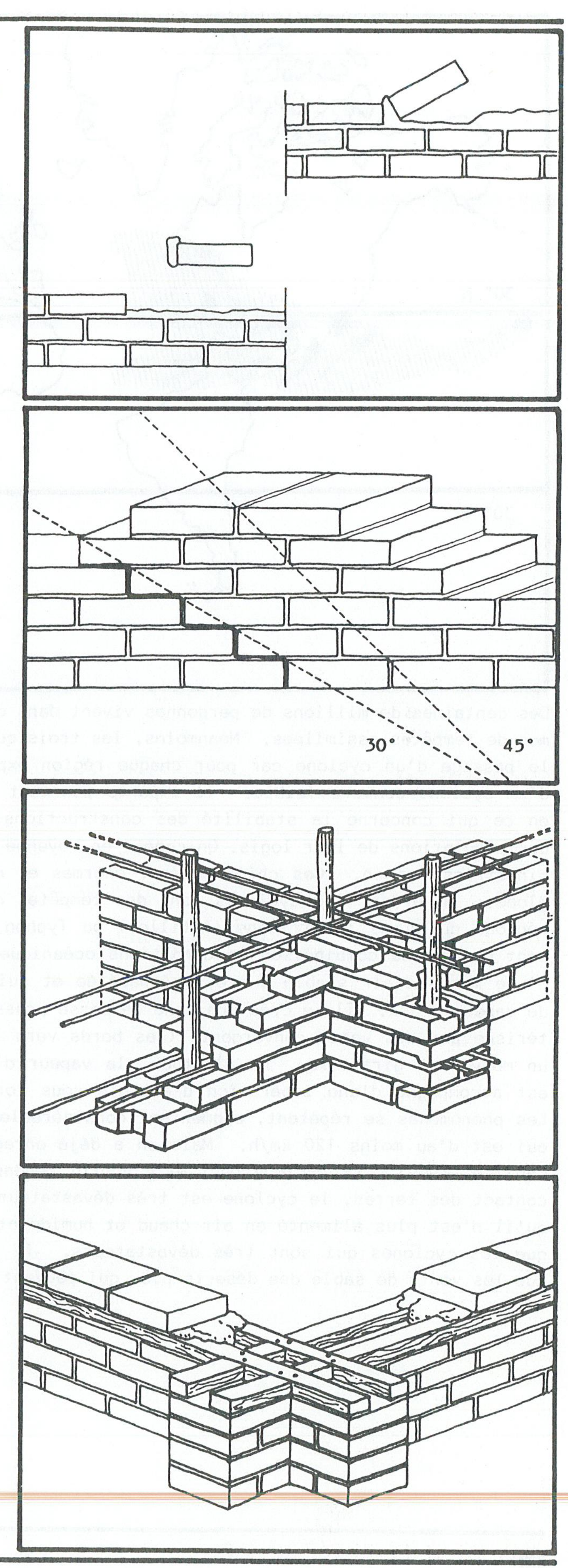
Les recherches péruviennes montrent que la brique de forme carrée aux dimensions précitées - L = 40 cm, l = 38 cm, h = 10 cm - offre une résistance à une force sismique 4 fois supérieure à une brique rectangulaire de 40 x 19 x 12. Le rapport dimensionnel de 4 à 1 (L à h) et un parfait calepinage s'oppose à l'effet de fissure transversale qui adopte un angle à 45°. En effet, avec une brique carrée dans le rapport L à h précisé, la direction courant sur les joints est de 30°.

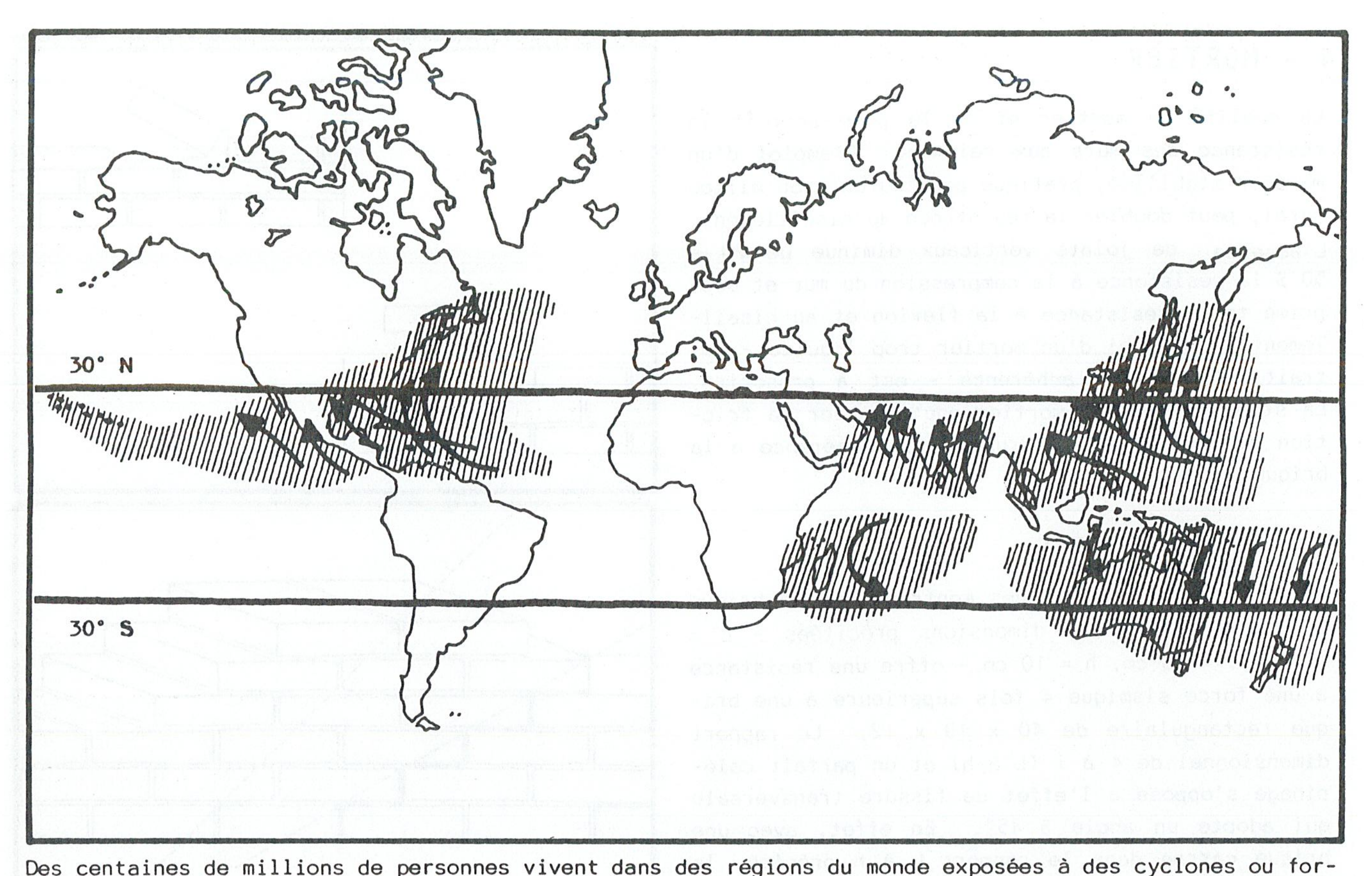
6 - MACONNERIE ARMEE

Il est possible d'armer des murs en briques ordinaires mais il est préférable d'employer des briques spéciales. Les armatures classiques, verticales et horizontales sont réalisées en bambou, en eucalyptus, en aciers de maçonnerie ou fers à béton, en fil de fer barbelé ou même en simples branchages croisés. Avec un mortier de terre stabilisé au ciment et une armature, la résistance à la traction du mur peut être augmentée de 10 fois par rapport à un mur normal. Sa résistance à la flexion peut être augmentée de 40 fois. Par contre, la résistance au cisaillement n'est pas améliorée.

7 - CHAINAGES

Il s'agit de l'élément constructif antisismique par excellence. En effet, pour qu'une maison en terre résiste à un séisme, il faut que tous les éléments se transmettent les forces les uns aux autres. Les chaînages bas (fondations armées) et haut reliés par des raidisseurs verticaux aux angles ou à la liaison orthogonale des murs assurent un lien rigide entre les 4 parois de la maison "boîte" et la toiture. L'absence de chaînage pour une maison en adobe anéantit tout autre effort de lutte antisismique.





Des centaines de millions de personnes vivent dans des régions du monde exposées à des cyclones ou formes de tempêtes assimilées. Néanmoins, les trois quarts de cette population n'ont pas directement vécu le passage d'un cyclone car pour chaque région exposée, la probabilité d'une situation à l'épicentre d'un cyclone demeure faible. Il importe pourtant d'être conscient des désastres encourus, notamment en ce qui concerne la stabilité des constructions. Chaque année, des cyclones dévastateurs privent des populations de leur logis. On compte en moyenne 23 000 personnes tuées et 2,6 millions de personnes sinistrées par an. Ces chiffres sont énormes et concernent principalement les régions tropicales du globe. En effet, les cyclones sont des tempêtes d'origine tropicale, différemment nommées selon les régions du globe : Hurricane (Antilles) ou Typhon (Chine, Japon), ouragan ou tornade. Les cyclones sont dus à une combinaison de conditions océaniques et atmosphériques : présence d'une mer chaude et d'une masse d'air stable qui est réchauffée et qui s'élève, entraînant avec elle une grosse quantité de vapeur d'eau. Il se crée une zone de basse pression entourée d'une zone de haute pression et caractérisée par des vents convergents (des bords vers le centre) et ascendants (au centre), combinés dans un mouvement giratoire. En altitude, la vapeur d'eau se transforme en pluie. Ce changement d'état est accompagné d'une libération d'énergie sous forme de chaleur qui accentue l'ascendance de l'air. Les phénomènes se répètent, augmentent considérablement la taille du cyclone et sa vitesse de rotation qui est d'au moins 120 km/h. Mais on a déjà enregistré des vitesses de l'ordre de 320 km/h (cyclone Camille, 1969). Le cyclone peut être nourri pendant plusieurs jours au contact des mers chaudes. Au contact des terres, le cyclone est très dévastateur avant de décroître rapidement en intensité du fait qu'il n'est plus alimenté en air chaud et humide et brisé par les formes de relief. Mais il n'y a pas que les cyclones qui sont très dévastateurs. Il y a également les vents violents continentaux tels que les vents de sable des déserts p.e. qui peuvent également atteindre bien plus de 100 km/h.

MECANISMES DE DESTRUCTION

1 - EROSION DU TERRAIN

Les vents violents peuvent creuser le terrain aux abords des bâtiments. Les fondations sont mises à nu et attaquées en sous-oeuvre : effondrement de la construction. Ce mécanisme a pu être observé au Niger, à Niamey.

2 - PRESSION DES VENTS

Les murs exposés face aux vents subissent des poussées latérales très fortes qui peuvent les renverser. La pression est très élevée au centre du mur exposé et décroît aux angles pour être inférieure sur les murs non exposés. Ces pressions differentielles créent des tourbillons au ras du sol qui peuvent éroder le bâtiment.

3 - EROSION DES FONDATIONS

Les tourbillons violents qui s'échappent à grande vitesse par les côtés du bâtiment sont souvent chargés de matériaux abrasifs en suspension (sables) et ont tendance à attaquer les ouvrages de soubassements et de fondations, risquant de provoquer la ruine du bâtiment.

4 - SUCCION SUR MURS

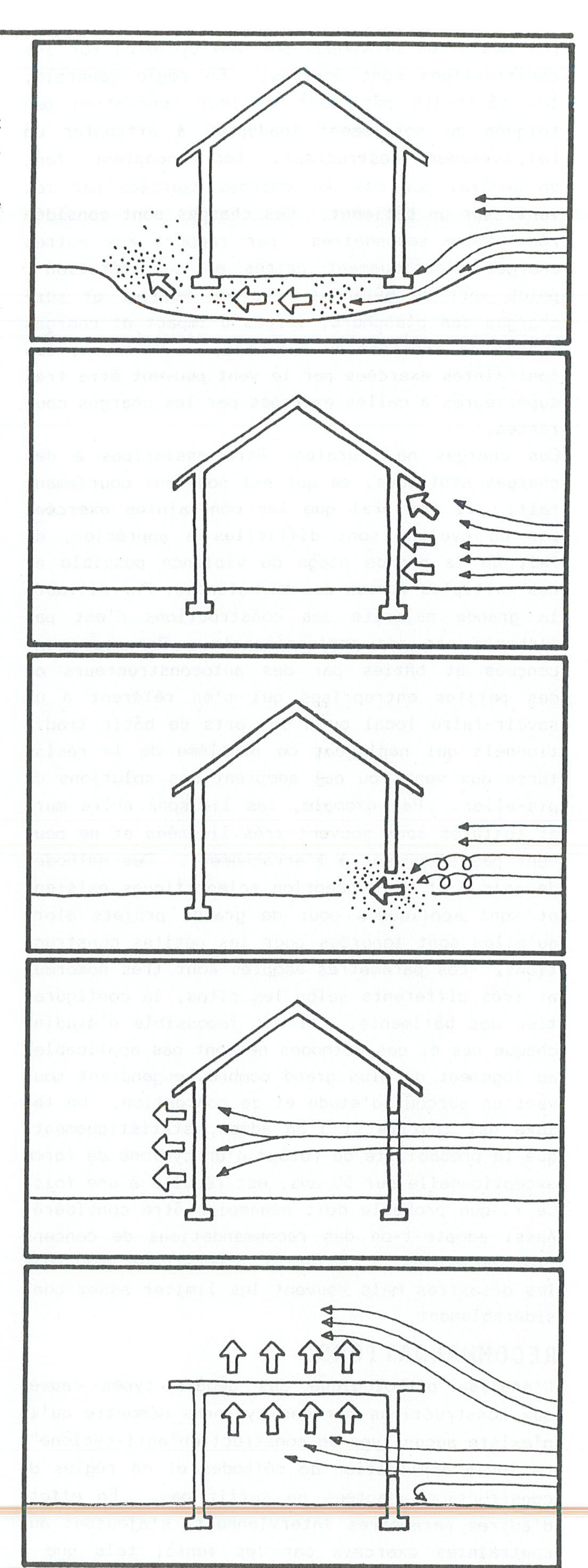
Sur les murs non directement exposés aux vents (côtés et arrière du bâtiment), les turbulences et les basses pressions engendrent des phénomènes de succion exercés sur les murs. Il peut alors se produire un arrachement de matériaux ou de parties de l'édifice.

5 - SUCCION SUR TOITURES

Selon la proximité du flot des vents contre la surface de la toiture, une succion peut s'exercer sur la poutre directement exposée. Le phénomène dépend aussi de la pente du toit, étant plus important sur les surfaces horizontales (terrasses) et de pente inférieure à 30°. Des turbulences en spirale (vortex) sont notoires sur les rives, exerçant des succions locales qui peuvent arracher la toiture en tout ou partie. L'effet peut être amplifié par une surpression sur la face inférieure du toit.

NB - COMPLICATIONS

Les mécanismes sus-décrits s'appliquent à des bâtiments isolés et de conception simple : plan rectangulaire et toiture à 2 pans. Quand l'architecture est fouillée, décrivant des plans en U ou en L, et adoptant des détails tels que saillies, auvents, balcons, cheminées ou lorsque les bâtiments sont groupés, les mécanismes sont alors plus compliqués.



Les désastres provoqués par les cyclones sur les constructions sont énormes. En règle générale, les bâtiments pâtissent de leur conception peu soignée ou totalement inadaptée à affronter un tel évènement destructeur. Les concepteurs font en général peu cas des charges exercées par les vents sur un bâtiment. Ces charges sont considérées comme secondaires par rapport aux autres charges classiquement prises en considération : poids mort du bâtiment, charges mobiles et surcharges des planchers, forces d'impact et charges dues à la pression du sol, etc... Pourtant, les contraintes exercées par le vent peuvent être très supérieures à celles exercées par les charges courantes.

Ces charges ne sauraient être assimilées à des charges statiques, ce qui est pourtant couramment fait. Il est vrai que les contraintes exercées par un cyclone sont difficiles à apprécier, du fait de la grande plage de violence possible et des multiples formes des turbulences. Par ailleurs la grande majorité des constructions n'est pas élaborée par des professionnels. Beaucoup sont conçues et bâties par des autoconstructeurs ou des petites entreprises qui s'en réfèrent à un savoir-faire local ou à des arts de bâtir traditionnels qui négligent ce problème de la résistance aux vents ou qui adoptent des solutions de pis-aller. Par exemple, les liaisons entre murs et toitures sont souvent très limitées et ne peuvent pas s'opposer à l'arrachement. Des méthodes de calcul et de conception scientifiques existent et sont appliquées pour de grands projets alors qu'elles sont ignorées pour les petites constructions. Les paramètres adoptés sont très nombreux et très différents selon les sites, la configuration des bâtiments. Il est impossible d'étudier chaque cas et ces méthodes ne sont pas applicables au logement du plus grand nombre, engendrant souvent un surcoût d'étude et de conception. Un tel luxe est inutile si l'on admet, statistiquement, que la probabilité de retour d'un cyclone de force exceptionnelle sur 50 ans, est réduite à une fois. Ce risque probable doit néanmoins être considéré. Aussi adopte-t-on des recommandations de conception générales. Celles-ci n'empêchent pas tous les désastres mais peuvent les limiter assez considérablement.

RECOMMANDATIONS

L'analyse pathologique des dégâts typés causés aux constructions par des cyclones démontre qu'il n'existe aucun type de construction"anti-cyclone". La seule application de méthodes et de règles de construction adaptées ne suffit pas. En effet, d'autres paramètres interviennent, s'ajoutant aux contraintes exercées par les vents, tels que :

- la nature du sous-sol;
- l'environnement et le site (relief, végétation, urbanisme);
- le modèle architectural (forme, volume, détail);
- etc ...

En général, les principaux points faibles sont les suivants :

- effondrement de murs;
- ruptures de liaisons structurales faibles;
- fondations inexistantes ou réduites au minimum;
- poteaux de structure mal ancrés dans le sol;
- toitures arrachées.

1 - RECOMMANDATIONS GENERALES

Il convient d'appliquer les codes de bonne pratique et d'assurer l'entretien de la construction. On prendra notamment en considération la stabilité de l'ensemble du bâtiment et la résistance propre au vent de chaque partie constituant le bâtiment (fondations, murs, toitures, etc ...). Aucune force latérale ne doit pouvoir renverser ou déplacer le bâtiment. L'entretien prendra soin de la dégradation des liaisons entre les différents systèmes - fondations/murs, murs/toitures - et l'on empêchera tout minage des fondations par l'eau, par érosion éolienne ou par action des termites. Dans le cas de cyclones, l'action des vents violents est souvent doublée d'inondations. Il faut donc également prendre en compte les recommandations formulées pour les inondations.

2 - SITE

- Tirer parti des protections naturelles. Implanter la construction à l'abri du relief (collines) ou de la végétation (bosquets, haies) qui s'opposent à l'action des vents dominants.
- Eviter les reliefs trop accidentés et très pentus qui peuvent accélérer la vitesse du vent de l'ordre de 50 %.
- Eviter les sites de brêches ou de sols qui peuvent canaliser les vents.

3 - URBANISME

La proximité des bâtiments affecte la vitesse des vents. Des effets de succion sont sensibles sur le haut des murs-pignons. Entre deux bâtiments proches et alignés,des turbulences peuvent exercer des contraintes sur des éléments tels que bardages. S'assurer de leur bonne fixation. En règle générale, ne pas aligner les constructions pour éviter de canaliser les vents augmentant ainsi leur vitesse et leur puissance destructrice.

4 - PARCELLE

Sur la parcelle, prévoir des pare-vents maçonnés ou végétaux. Choisir des essences à racines profondes. Construire des murets ajoutés, type claustras, qui divisent la force du vent. Prévoir de bonnes fondations pour stabiliser ces clôtures solidement maçonnées. Toutes les constructions annexes, hangars, garages, cabanes de jardin, remises, doivent être solides pour ne pas être renversées et percuter la maison. Pour ces annexes, éviter les murs trop minces. Nettoyer les abords de la maison de tous objets et débris qui pourraient être transportés par les vents.

5 - FORME

Préférer les formes rondes (dômes, voûtes) et le cube au parallélépipède. Adopter les rapports suivants : Longueur/largeur ≈ 1,5 et Hauteur/largeur ≈ 1. Ecraser les volumes et réduire l'exposition des murs aux vents dominants. Orienter de préférence un angle à la direction d'attaque des vents.

6 - FONDATIONS

Les fondations doivent permettre un bon ancrage de la structure de la maison. Elles seront profondes pour ne pas être mises à nu par les vents et bâties en matériaux solides et durables(pierre, terre stabilisée).

7 - MURS

Elever les murs au droit des fondations. S'assurer d'une bonne liaison entre les fondations et les murs. Quel que soit le matériau employé, prévoir des armatures verticales (fers, bambous ou autres) ancrées aux fondations. Prévoir également des armatures horizontales, notamment aux angles qui doivent être renforcés dans tous les plans. Les murs sont si possible lourds et massifs, en pisé, en adobe ou en blocs comprimés. Stabiliser la terre si les conditions économiques le permettent. L'appareil est soigné (calepinage) pour éviter les fissures. Les murs légers en torchis ou en terre paille sont bien contreventés et l'ossature solidarisée aux fondations. S'assurer de la rigidité de la structure : murs de refend et chaînages. On peut employer le mortier de terre pour bâtir.

8 - POTEAUX-PILIERS

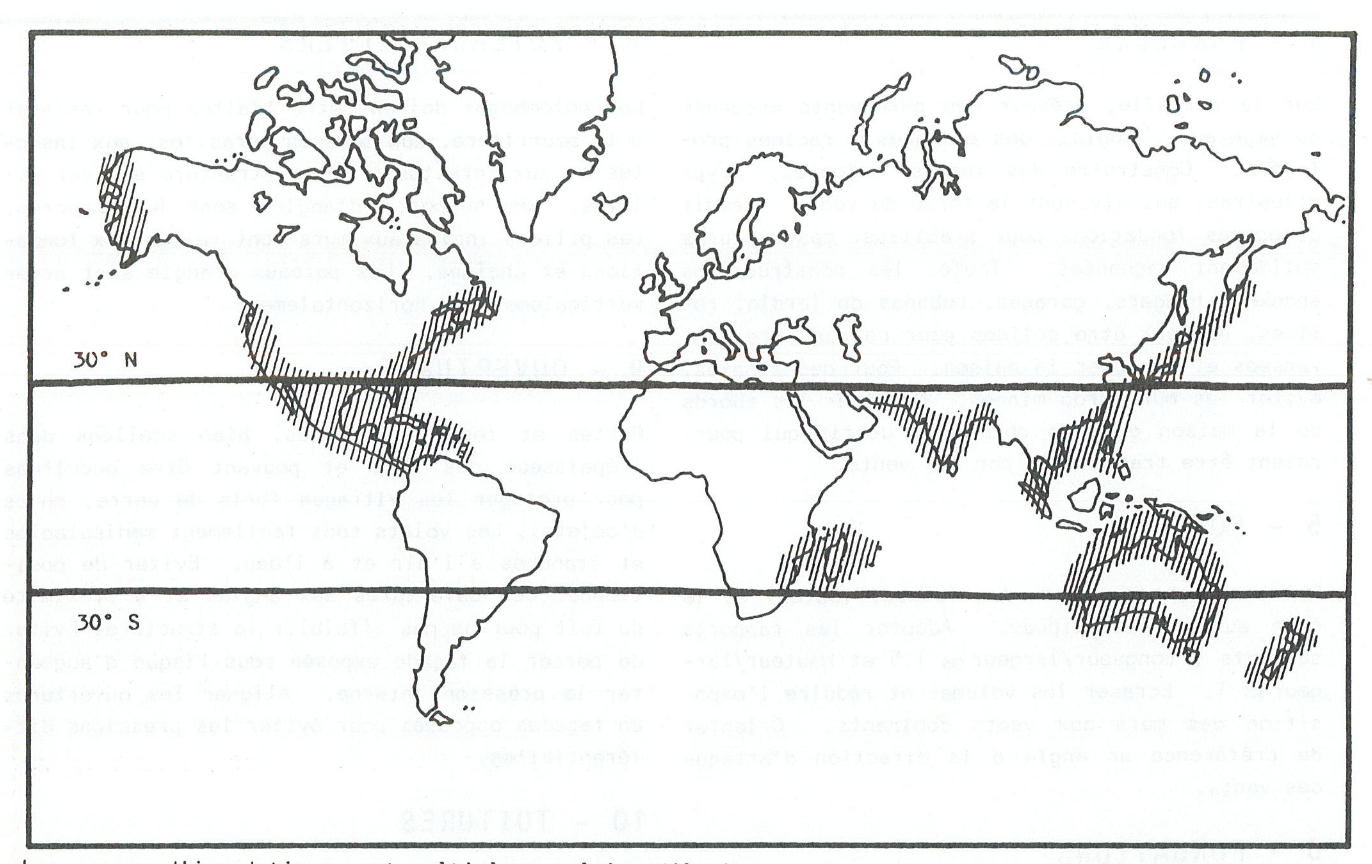
Les colombages doivent être traités pour résister à la pourriture, aux mousses parasites, aux insectes et aux termites. Si la structure est sur pilotis, les supports d'angles sont bien ancrés. Les piliers inclus aux murs sont reliés aux fondations et chaînés. Les poteaux d'angle sont armés verticalement et horizontalement

9 - OUVERTURES

Portes et fenêtres lourdes, bien scellées dans l'épaisseur des murs et pouvant être occultées pour protéger les vitrages (bris de verre, chocs d'objets). Les volets sont facilement manipulables et étanches à l'air et à l'eau. Eviter de positionner des ouvertures aux angles et à proximité du toit pour ne pas affaiblir la structure. Eviter de percer la façade exposée sous risque d'augmenter la pression interne. Aligner les ouvertures en façades opposées pour éviter les pressions différentielles.

10 - TOITURES

Les toitures doivent être lourdes et de forme aérodynamique : dômes, voûtes, cônes, 4 pans. Prévoir des pentes proches de 30° pour réduire les contraintes qui sont fortes pour des pentes de 5 à 10° ou pour des terrasses. L'acrotère réduit l'effet de succion sur les toits plats. Eviter les débords de toiture supérieurs à 50 cm (arrachements). Des aérateurs placés en faîtage réduisent la pression interne. On s'assure que les toitures légères (chaume, tuiles) sont bien ancrées (filet ou mortier).



Les causes d'inondations sont multiples : pluies diluviennes, crues de cours d'eau, rupture de barrage ou de digue, séismes, éruptions volcaniques, cyclones. Mais les inondations les plus meurtrières proviennent des raz de marée. Ceux-ci sont liés à des perturbations géologiques ou atmosphériques. Les ruptures de failles sous-marines ou les glissements de terrains sous-marins, souvent provoqués par des séismes, mettent l'eau en mouvement. D'énormes vagues de surface partant de l'épicentre du séisme traversent l'océan et atteignent un rivage. Les effets sont dévastateurs. Un tel cataclysme est différemment nommé : raz de marée ou tsunami (Japonais). La terminologie japonaise est la plus employée car le Japon a particulièrement souffert de telles catastrophes. 26 000 personnes furent tuées par une vague déferlante haute de 25 à 35 mètres au-dessus des hautes marées, lors du tsunami de Honshu, le 15 juin 1896. On compte en moyenne un tsunami par an de par le monde, souvent plus dévastateur qu'un violent séisme. Tous les grands océans et la plupart des mers ont été touchés et demeurent exposés. Au cours des deux derniers siècles, 300 tsunamis ont ravagé des territoires côtiers. Mais il y a aussi des "seiches" ou vagues locales, dans des baies, des lacs ou des retenues de barrages, provoquées par des avalanches de terrain. La hauteur des vagues d'un tsunami et d'une seiche dépend de la topographie des fonds marins et de la forme du littoral exposé. Des côtes abritées peuvent être épargnées. Les vagues ne sont pas très hautes en eau profonde mais sont soudainement amplifiées lorsqu'elles atteignent le littoral. C'est alors un véritable front d'eau vertical qui se déverse brutalement sur le rivage, balayant toutes constructions et n'épargnant que peu de vies humaines. Les tsunamis ont aussi une origine atmosphérique. A l'épicentre des cyclones, la pression d'air est très basse créant une aspiration verticale qui élève le niveau des eaux. Les vents augmentent le volume d'eau et le contact du cyclone avec le littoral amplifie la hauteur de la vague déferlante dévastatrice. De tels tsunamis peuvent s'abattre sur plusieurs kilomètres de côte et leur force dépend tout à la fois de la pression d'air à l'épicentre du cyclone,de la vitesse des vents et d'avancement du cyclone et du niveau de marée au moment de l'impact. En Inde, en novembre 1970, la hauteur du raz de marée qui s'abattit sur Andhra Pradesh fut de 20 mètres.

MECANISMES DE DESTRUCTION

1 - LA FORCE DE LA VAGUE

Un front de vagues haut de plusieurs mètres déferle avec beaucoup de force contre les murs des habitations. Le choc est d'une extrême violence pouvant renverser la structure. Ceci dépend de la masse d'eau et de la vitesse d'avancement des vagues.

2 - L'IMPACT D'OBJETS

Les vagues peuvent charrier des objets ou des débris arrachés lors de son passage - troncs d'arbres, rochers, morceaux de constructions. Le choc de ces objets contre le mur agit comme de véritables coups de bélier.

3 - EROSION HYDRAULIQUE

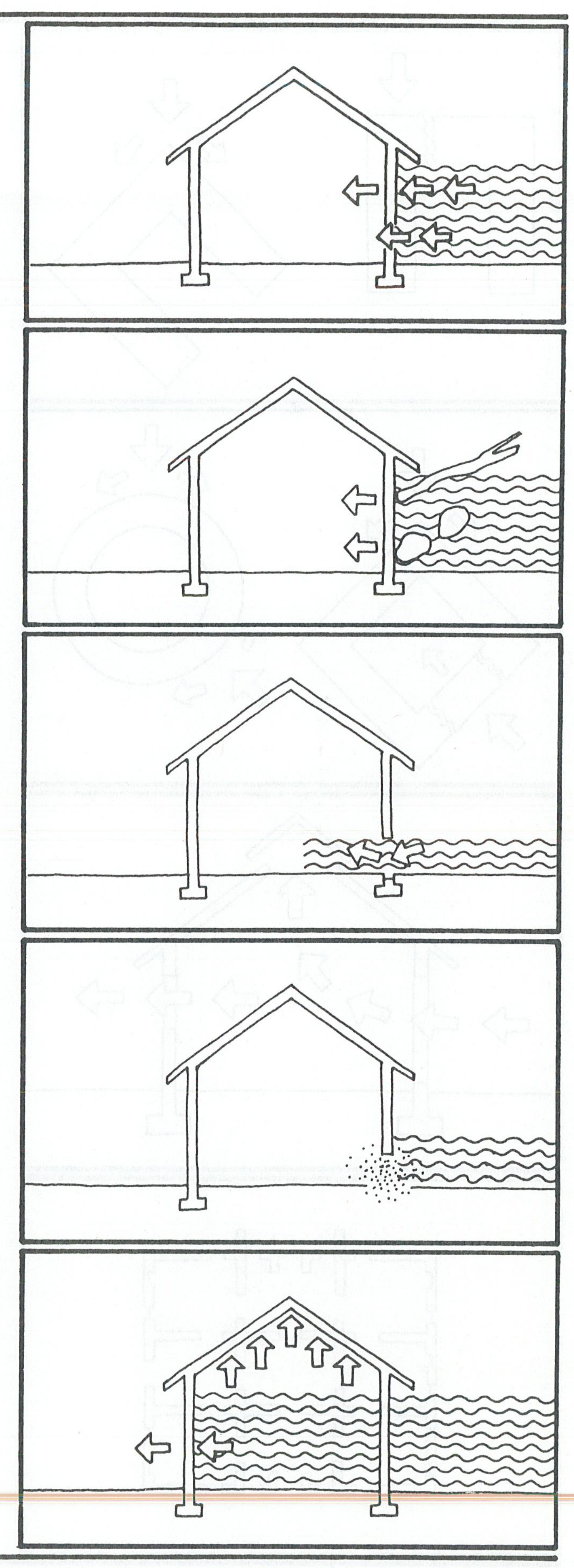
Contre des fondations et des soubassements peu résistants, l'eau, par sa vitesse, son débit et ses turbulences, érode la base de l'ouvrage. Ce peut être également une érosion du terrain en sous oeuvre qui peut entraîner un arrachement de la construction.

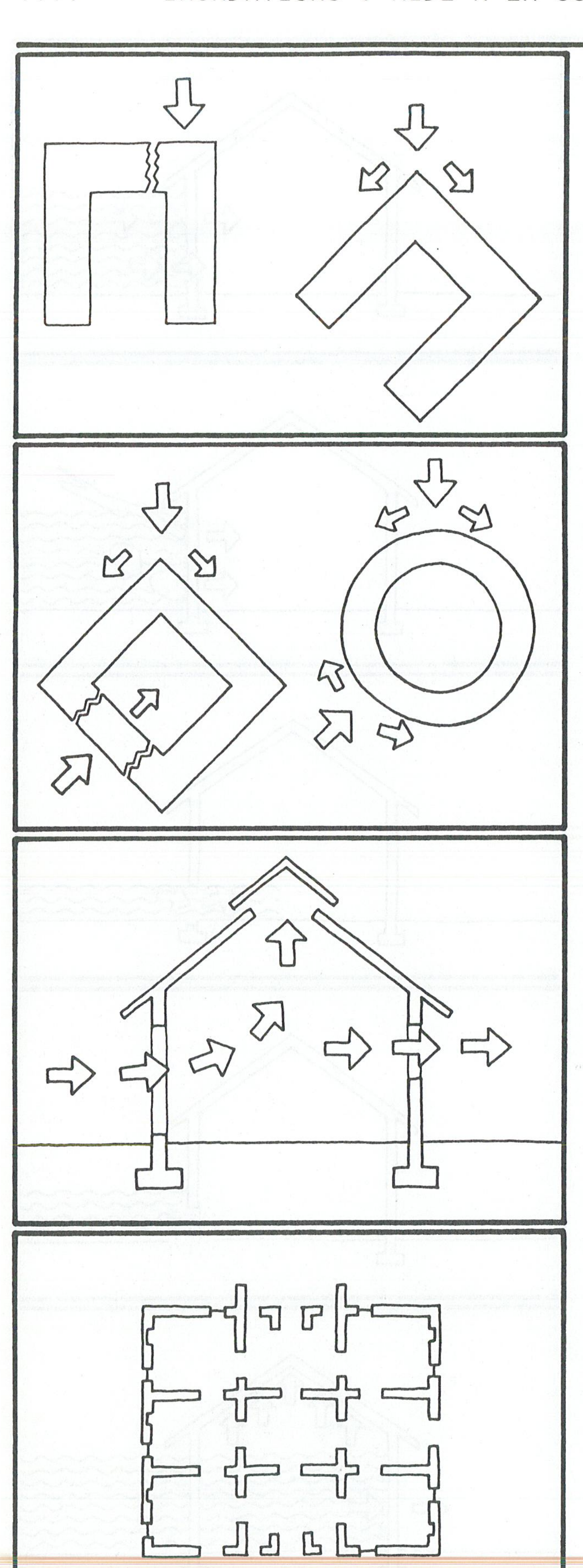
4 - EROSION PAR ABRASION

L'eau peut être abondamment chargée de cailloux, de graviers, de sables ou de limons en dispersion temporaire. Ces matériaux peuvent avoir une action abrasive par "sablage" sur les ouvrages de fondations jusqu'à les éroder totalement. Ce peut être aussi un sablage du terrain en sous-oeuvre. La construction qui n'est plus soutenue s'effondre.

5 - PRESSION DIFFERENTIELLE

La pénétration de l'eau dans la maison et son ascension dans l'emprise du volume habitable peut exercer des pressions différentielles sur les murs. La création d'un tampon d'air surpressurisé en sous-plafond peut provoquer un éclatement de la toiture. L'effondrement de parties de l'édifice, murs, fondations, soubassements ou toiture accélère sa ruine totale.



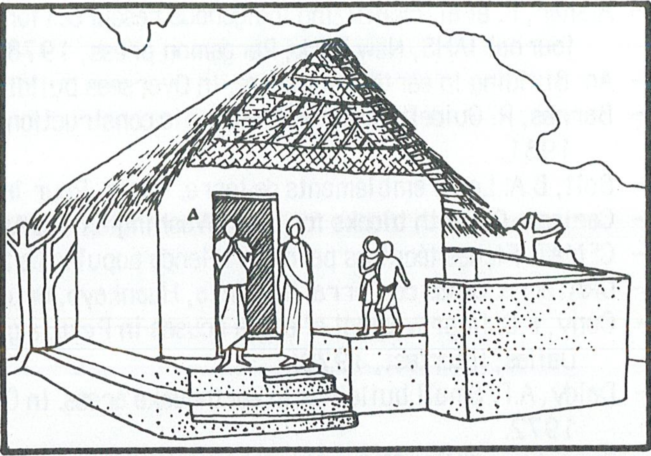


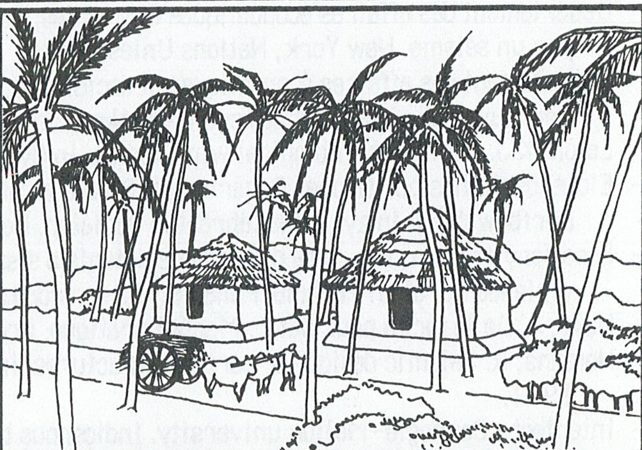
RECOMMANDATIONS GENERALES

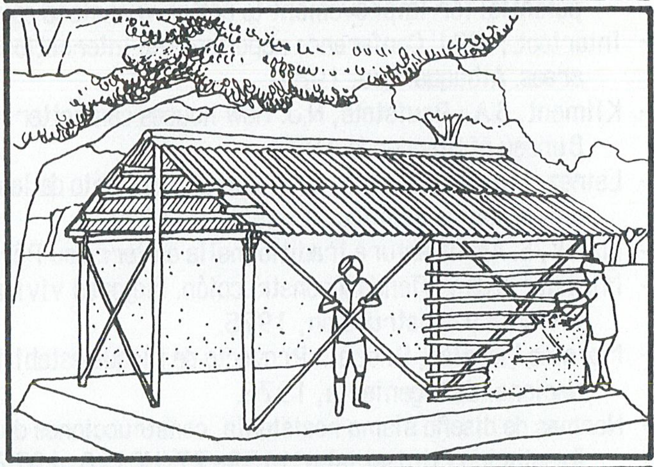
- Ne pas lotir les rives de retenues d'eau, lacs ou baies; risques de glissement de terrain et de vague locale. Implanter en hauteur, sur terrains drainés et protégés par une végétation.
- Entourer la maison de plantations et de clôtures résistantes pour briser la force de la vague.
- Ne pas aligner les maisons pour ne pas canaliser la vague et augmenter son débit. Réduire l'exposition des murs au sens d'arrivée de la vague.
- Nettoyer les abords de la maison de tous objets ou débris lourds pouvant agir comme un bélier. Rehausser le niveau des trottoirs et pavements.
- Préférer les formes rondes. Pour les formes quadrangulaires, adopter un rapport longueur/largeur $\approx$ 1,5 et hauteur/largeur $\approx$ 1.
- Respecter les codes de bonne pratique : bon ancrage et protection anti-termite, bon entretien.
- Adapter le poids de la maison à la nature du sol porteur. Mauvais sol : structures légères. En cas de bon sol, préférer les murs massifs et lourds.
- Fondations profondes et solides, bien ancrées; soubassements élevés. Bonne maçonnerie et matériaux durables pour ces deux systèmes constructifs.
- Murs renforcés et contreventés. Liaisonner les fondations aux murs et les murs aux toitures.
- Structure rigide : murs de refend.
- Eviter les piliers simples porteurs maçonnés.
- Les matériaux légers ne sont employés qu'en remplissage : facile à réparer.
- Réduire la pénétration de l'eau : portes et fenêtres lourdes, bien ancrées pour éviter l'arrachement.
- Aligner les ouvertures de deux façades opposées pour éviter les pressions differentielles.
- Réduire le poids des planchers et des toitures : danger de chute des débris en cas d'effondrement.
- Prévoir des orifices en planchers et toitures (trémies, lucarnes) pour aider la fuite des occupants et l'échappée de l'air et de l'eau (réduction des pressions différentielles).
- Prévoir l'accès à des terrasses élevées (escalier) pour favoriser la fuite des occupants.

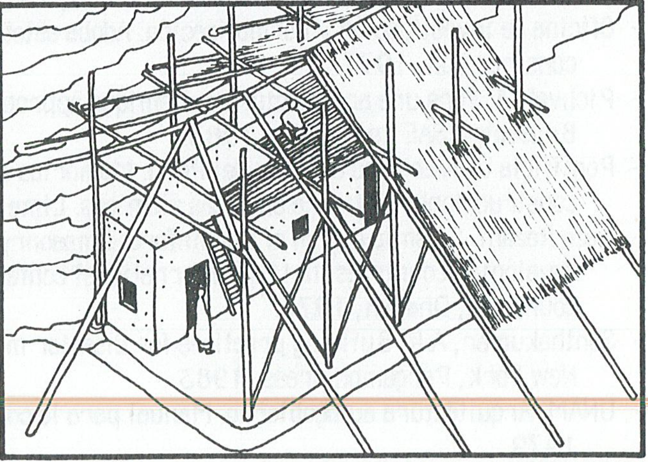
RECOMMANDATIONS PROPRES A L'EMPLOI DE LA TERRE

- Armature verticale des clôtures en pisé, bauge ou torchis par piquets bien ancrés. Armature horizontale par branchages, fil barbelé, etc ...
- Trottoirs en terre stabilisée ou armée. Terre fortement compactée.
- Dans les zones exposées à des marées exceptionnelles, élever les constructions au-dessus du niveau des eaux : digues, terrassements, remblais, pilotis de bois ou colonnes en béton armé, etc
- Empêcher le minage d'une partie de l'édifice par les infiltrations d'eau : réduction de la stabilité.
- Pour les constructions lourdes, préférer les systèmes monolithiques lourds en pisé, bauge ou adobe. Pour les constructions légères, adopter le colombage hourdé de terre-paille ou de torchis.
- Eviter les fondations et les soubassements en terre. S'il n'y a pas d'autre choix, stabiliser fortement la terre. Eviter l'emploi de terre non stabilisée en mortier de maçonnerie (pierre p.e.)
- Armer les maçonneries en blocs comprimés, adobe ou pisé et autres techniques. Bien soigner l'ossature des maisons en terre-paille ou en torchis, ou hourdées de briques crues. Les remplissages peuvent être érodés sans provoquer la ruine de l'édifice.
- Incorporer des chaînages et des armatures dans les maçonneries.
- Eviter les piliers porteurs en éléments de terre maçonnés. Prévoir ces piliers en terre stabilisée, massifs et bien fondés.
- Soigner l'ancrage des portes et fenêtres. Prévoir leur pose au milieu des panneaux de murs.
- Eviter de poser les toitures directement sur les murs de terre crue qui peuvent s'éroder et ne plus les soutenir.









- Afshar, F. et al. Mobilizing indigenous resources for earthquake construction. In International journal IAHS, New York, Pergamon press, 1978.
- An. Building in earthquake areas. In Overseas building notes, Garston, BRE, 1972.
- Barnes, R. Guidelines for anti-seismic construction. In Adobe Today. Albuquerque, Adobe News, 1981.
- Bolt, B.A. Les tremblements de terre. Paris, Pour la science, diffusion Belin, 1982.
- Carlson, G. Earth blocks for Laos. Washington, US Aid/IVS, 1964.
- CEMAT. Fichas técnicas para la vivienda popular de zonas sísmicas. Guatemala, CEMAT, 1976.
- CRATerre. Casas de tierra. In Minka, Huankayo, Grupo Talpuy, 1982.
- Cuny, F.C. Improvement of adobe houses in Peru: a guide to tchnical considerations for agencies. Dallas, Intertect, 1979.
- Daldy, A.F. Small buildings in earthquake areas. In Overseas building notes, Garston, BRE, 1972.
- Departement des affaires économiques et sociales. Comment réparer les bâtiments endommagés par un séisme. New York, Nations Unies, 1976.
- Departement des affaires économiques et sociales. Construction d'habitations à bon marché à l'épreuve des séismes et des cyclones. New York, Nations Unies, 1976.
- Eaton, K.J. Buildings in tropical windstorms. In Overseas building notes, Garston, BRE, 1981.
- Eidgenössisches politisches Department. Studie zu besserem baulichem Schutz indischer Dorfbewohner in zyklonge fährdeten Gebieten. Bern, EPD, 1978.
- Escoffery Alemán, F.A. Casa de adobe resistente a sismos y vientos como solución al problema de vivienda rural en Panamá. Panamá, Universidad Santa María la Antígua, 1981.
- Hays, A. De la terre pour bâtir. Manuel pratique. Grenoble, UPAG, 1979.
- Homans, R. Seismic design for earthen structures. In Adobe Today, Albuquerque, Adobe News, 1981.
- Intertect.; Carnegie-Mellon university. Indigenous building techniques of Peru and their potential for improvement to better withstand earthquakes. Washington, US AID, 1981.
- Intertect.; UNM. Conference report of the International workshop earthen buildings in seismic areas. Albuquerque, 1981.
- Kliment, S.A.; Raufstate, N.J. How houses can better resist high wind. Washington, National Bureau of Standards, 1977;
- Lainez-Lozada, Navarro, et al. Comportamiento de las construcciones de adobe ante movimientos sísmicos. Lima, LLN, 1971.
- Matuk, S. Architecture traditionnelle en terre au Pérou. Paris, UPA.6, 1978.
- Ministerio de vivienda y construcción. Mejores viviendas con adobe. Lima, Ministerio de vivienda y construcción, 1975.
- Morales Morales, R. et al. Proyecto de bloque estabilizado. Estructuras. Lima, Universidad Nacional de Ingeniería, 1976.
- Normas de diseño sismo resistente, construcciones de Adobe y bloque estabilizado, RNC. Lima, Resolucion Miniserial n°1159-77/UC110, 1977.
- Oficina de investigación y normalización. Adobe estabilizado. Lima, Ministerio de vivienda y construcción, 1977.
- Pichvaï, A. Vers une architecture antismique appropriée. Constructions rurales en terre. Brussels, ISAE La Cambre, 1983.
- Pontifícia Universidad Católica del Perú. Memórias seminário latinoamericano de construcciones de tierra en areas sismicas. Lima, PUCP, 1983.
- Reza Razani. Seismic design of unreinforced masonry and adobe low-cost buildings in developing countries. In IAHS international conference of housing problems in developing countries, Dharan, 1978.
- Santhakumar, A.R. Building practices for disaster mitigation. In international journal IAHS, New York, Pergamon press, 1983.
- UNAM. Arquitectura autogobierno. Manual para la construcción de viviendas con adobe. UNAM, 1979.

1200 PROTECTION DE SURFACE

L'architecture de terre n'est pas toujours construite sous des latitudes climatiques clémentes. Dans beaucoup de pays, la terre crue doit subir les rigueurs du froid et des intempéries. Sous les climats tempérés et continentaux où la construction en pisé ou en adobe, en bauge ou en torchis est très abondante, une bonne conception architecturale et un savoir-faire élaboré, un souci majeur d'économie permettaient de se passer d'enduits. Leur emploi pouvait être limité aux parties les plus exposées des édifices. Mais, la vision directe de la terre connote défavorablement le matériau, le dotant en maints esprits d'une image de pauvreté. Certaines époques ont cherché à dissimuler la terre crue sous un décor classique. Les enduits décorés, peints et moulurés, enrichissaient l'architecture de terre d'une modénature et d'un style noble. Sous d'autres contrées (tropiques p.e.), la protection de surface est indispensable, surtout quand la conception architecturale néglige les systèmes de protection élémentaires (soubassement et débord de toiture p.e.), ou lorsque le savoir-faire est trop peu élaboré.

L'architecture de terre souffre souvent d'une pathologie grave, à cause du risque d'intempérie. Aujourd'hui, lorsqu'une protection des murs de terre est souhaitable, voire nécessaire, des solutions techniques existent, très variées et sans doute adaptées à de très nombreux contextes locaux. Mais ces solutions sont trop souvent mal appliquées et les résultats peu satisfaisants. Les solutions choisies doivent être avant tout adaptées aux économies locales car la protection des murs de terre est encore trop souvent d'un coût rédibitoire.

En abordant ce problème, la confrontation au couple efficacité technique - économie est inévitable. Les solutions adoptées devront être convenablement évaluées et mises en oeuvre pour garantir leur succès.

Le matériau terre et la construction qui l'emploie pâtissent d'une mauvaise image. On leur reproche notamment leur faible durabilité aux intempéries. Cela est vrai pour des constructions en terre élémentaires dont la mise en oeuvre est peu soignée. Cela est moins vrai pour des constructions réalisées avec des matériaux de qualité et dont la mise en oeuvre répond aux règles de l'art spécifiques au matériau terre, assurant notamment sa protection.

Certes, la plus grande partie du parc de logements mondial en terre, pour majorité rurale, présente une pathologie certaine vis-à-vis de l'action des intempéries : érosion de surface, écroulement partiel, insalubrité due à un état humide durable, murs creusés en leur base, etc ... Il convient donc, à l'égard de ce parc existant, de proposer des solutions efficaces de restauration et de protection; solutions qui soient aussi adaptées à la protection d'un parc actuellement sain et susceptible de se dégrader par manque de protection efficace. Il convient enfin que ces solutions soient adoptées dans la construction du parc immobilier en terre actuel ou à venir afin que cette tendance pathologique soit jugulée.

Par ailleurs, on ne peut envisager un renouveau cohérent et réellement faisable de la construction en terre sans que le matériau réponde aux problèmes posés à l'égal des autres matériaux modernes. La terre doit donc désormais fournir des constructions qui démontrent leur qualité, sans contestation possible. Cet objectif sera couvert grâce à une amélioration de la qualité du matériau lui-même et des techniques de mise en oeuvre mais aussi grâce à une large diffusion de techniques qui réduiront manifestement la sensibilité des surfaces en terre à l'eau.

A l'égal des surfaces en autres matériaux modernes, les surfaces en terre doivent pouvoir recevoir des revêtements de protection répondant aux spécifications actuelles des parements. Car l'image de qualité de la terre passera par son assimilation à un matériau résolument moderne. La nécessité de protection du matériau terre, bien avant d'être située au niveau des revêtements, demeure tributaire de la qualité du matériau, de la conception et de la mise en oeuvre de la construction. Entre la stabilisation du matériau et l'emploi systématique d'enduits non érodables - orientations les plus fréquemment développées - le registre de solutions de protection de surface est assez large pour assurer une durabilité, sans recourir à des solutions "miracle". Car aujourd'hui, sur de très nombreuses constructions observées par les experts, la stabilisation et les enduits sont encore très rarement satisfaisants et n'apportent pas toujours des améliorations durables.

NECESSITE D'UNE PROTECTION

Tout mur de terre doit pouvoir résister à l'humidité et à l'action directe de l'eau. Cette résistance à l'eau d'un mur de terre est avant toute chose tributaire de la qualité de la terre elle-même, de sa texture et de sa structure, de sa porosité. Elle peut être améliorée par l'apport d'un stabilisant -sous des conditions contrôlées- ou par l'emploi de revêtements protecteurs -compatibles avec le matériau- ou par la conception et la mise en oeuvre de la construction - débords de toiture, auvents, etc ... Les solutions de protection par revêtements,ou autres, sont multiples; elles varient considérablement selon les régions du monde qui édictent leurs propres variables de la nécessité d'une protection du matériau.

D'une façon générale, pour les régions de climat tempéré, lorsque la terre est de qualité satisfaisante, les murs de terre résistent à l'érosion des intempéries pour peu qu'ils soient élevés sur de bonnes fondations et de bons soubassements et qu'ils soient protégés en leur partie haute. Si la terre est de qualité moyenne, la stabilisation peut apporter quelques améliorations sans toutefois éluder ces dispositions de protection élémentaires apportées au haut et au bas du mur.

Pour des zones de climat sec, les murs de terre protégés en leur partie haute par un débord du toit ou tout autre "chapeau", résistent bien quand ils sont susceptibles de ne pas être endommagés par une inondation. Dans toute région où la pluviométrie est basse, voire moyenne, la protection contre la pluie peut être assurée par les seules dispositions architecturales. Par contre, dans les régions où le climat est caractérisé par une pluviométrie élevée et par des pluies battantes d'indice quasiment horizontale (tropiques, p.e.), les revêtements protecteurs sont indispensables. Cette disposition est impérative pour des régions où les vicissitudes du climat sont associées à une tradition architecturale qui néglige les protections de la base et du haut du mur(architecture de terre sahélienne, p.e.). De même, les revêtements peuvent être plus ou moins nécessaires selon la technique de construction.

Ainsi, pour des murs de terre monolithiques(bauge, pisé, terre-paille, p.e.) convenablement protégés et non fissurés, le besoin d'une protection est moindre que pour des murs de terre en maçonnerie (adobe, blocs comprimés, p.e.) où l'eau peut pénétrer par l'interface brique-mortier, aux joints.

En principe, pour des constructions en terre stabilisée convenablement mises en oeuvre, les revêtements protecteurs ne sont pas nécessaires. Les murs de terre stabilisée résistent bien aux intempéries pendant plusieurs années. Un bon soubassement n'est toutefois pas inutile. Il est néanmoins prévisible qu'un mur de terre non protégé en sa partie haute puisse un jour ou l'autre se dégrader localement. Le revêtement protecteur peut donc être utile lorsque le besoin est manifeste, après quelques années de vie de la construction. Mais on retiendra l'idée que le recours systématique à un revêtement peut être onéreux et non nécessaire lorsque la protection s'avère inutile. De même, cette décision d'une protection de surface pourra être influencée par les conditions particulières d'occupation des locaux et d'entretien ultérieur.

Lorsque l'on peut se passer de revêtement, il faut s'efforcer d'obtenir une surface extérieure la plus lisse et la plus fine possible. Pour un pisé p.e., on repoussera les cailloux dans l'épaisseur du mur et l'on soignera le damage côté extérieur. Lorsque l'on prévoit la réalisation d'un enduit, les cailloux seront ramenés en parement extérieur et le mur pourra être moins damé pour obtenir une structure légèrement ouverte. Après une première saison d'exposition au climat, les cailloux seront apparents et faciliteront l'accrochage de l'enduit. Dans ce cas, le mur côté intérieur et dans son épaisseur sera fortement damé pour assurer sa résistance.

Avant d'envisager le recours à un revêtement,trois solutions sont possibles :

1 - réaliser une construction bien conçue, soit dotée de bonnes fondations et d'une barrière anticapillaire, de toitures débordantes, de chéneaux et descentes d'eaux pluviales, bien drainée et protégée contre le vent,construite dans les règles de l'art.

2 - stabiliser en évitant si possible de le faire dans la masse du matériau (surcoût) mais plutôt en parement extérieur; ou préférer l'emploi du stabilisant dans le revêtement imperméable (badigeon p.e.) plutôt que dans l'épaisseur du mur.

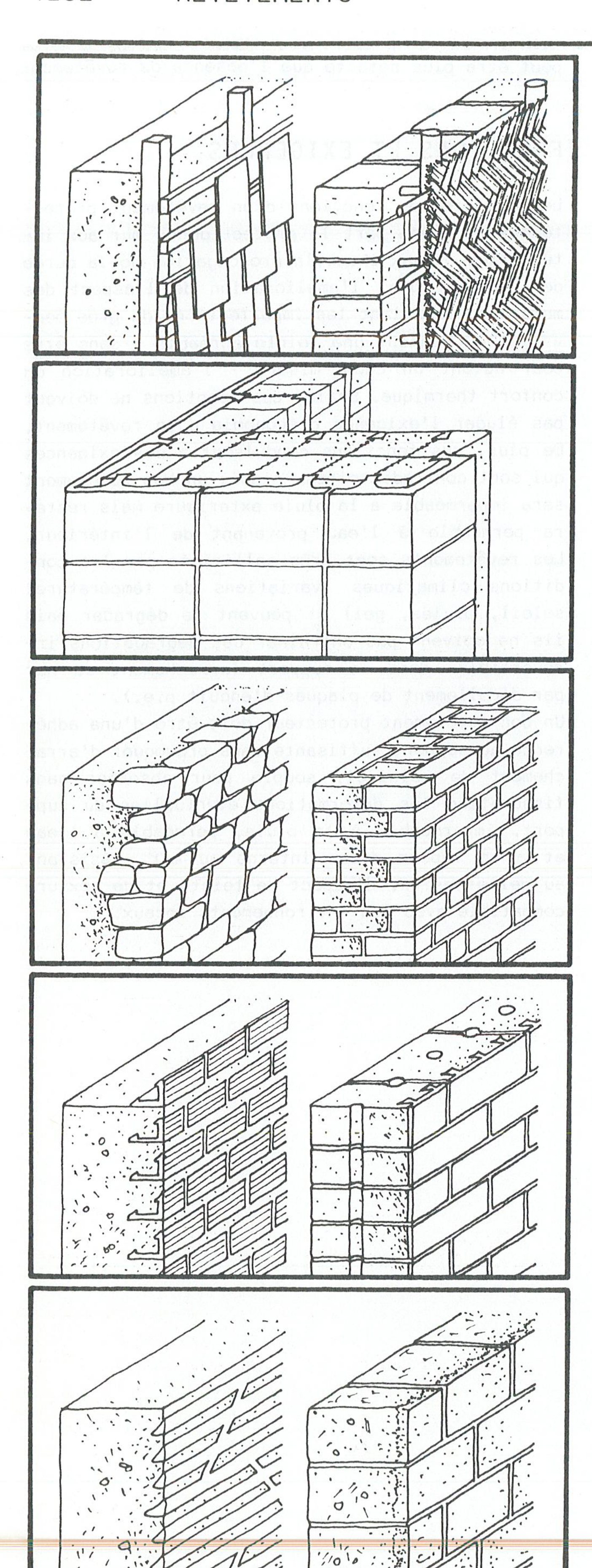
3 - réaliser un revêtement plusieurs années après lorsque la surface du mur est moins lisse, permettant un bon accrochage. La dégradation d'un mur en terre, en surface, est en effet très rapide les deux premières années mais se stabilise rapidement.

Il convient surtout de protéger les constructions contre le vent car celui-ci, associé à la pluie, peut être particulièrement corrosif, même à l'occasion de tempêtes très ponctuelles et de courte durée. Enfin, un revêtement non approprié au matériau terre ou inefficace parce que mal réalisé peut être plus néfaste que l'absence de revêtement.

FONCTIONS ET EXIGENCES

Les principales fonctions d'un revêtement protecteur sont d'une part la protection du mur aux intempéries et aux chocs,la prolongation de la durée de vie des murs, l'amélioration de l'aspect des murs en dissimulant les imperfections du gros oeuvre et en donnant une teinte agréable - sans être pour autant un cache-misère - l'amélioration du confort thermique. Enfin, ces fonctions ne doivent pas éluder l'exigence d'économie d'un revêtement. De plus, ces fonctions conduisent à des exigences qui sont contradictoires. Ainsi, un bon revêtement sera imperméable à la pluie extérieure mais restera perméable à l'eau provenant de l'intérieur. Les revêtements sont très sollicités par les conditions climatiques (variations de température, soleil, pluies, gel) et peuvent se dégrader mais ils ne doivent pas entraîner des dégradations irréversibles dans le support (arrachement du mur par décollement de plaques d'enduit p.e.).

Un bon revêtement protecteur doit être d'une adhérence au support suffisante sans provoquer d'arrachement de celui-ci, souple pour absorber sans fissuration les déformations éventuelles du support, imperméable à la pluie, perméable à l'eau et à la vapeur d'eau interne au mur, résistant au gel et enfin, d'aspect de teinte et de texture compatible avec les environnements locaux.



1 - BARDAGES

Ce sont des revêtements rapportés contre le mur et fixés sur une structure secondaire en bois ou métallique. Les bardages sont réalisés en matériaux divers : dosses de bois, planches, bardeaux, tuiles, éléments en fibro-ciment, tôles, systèmes d'isolation par l'extérieur, etc ...

2 - PLAQUIS

Des murs constitués de blocs de terre et un plaquis d'éléments en béton préfabriqués ont été utilisés en Allemagne, dans les années 1920. Les produits de terre et de béton doivent être d'excellente qualité de fabrication car les tolérances de dimensionnement sont très réduites.

3 - CARAPACES

Ce procédé de revêtement est connu depuis l'antiquité mésopotamienne avec la pose, à frais, de cônes de céramique vernissée en parement du mur. L'évolution de ce système s'est faite dans le sens de parements en galets ou en briques cuites tel que c'est le cas dans beaucoup de pays de l'Orient et de l'Asie. La carapace est montée en même temps que le mur en pisé, dans la banche, ou rapportée par la suite. Le système peut constituer un mur mixte dont la résistance homogène n'est pas toujours assurée : tassements différentiels du mur de terre et du parement-carapace. A déconseiller dans les zones sismiques.

4 - PLANELLES

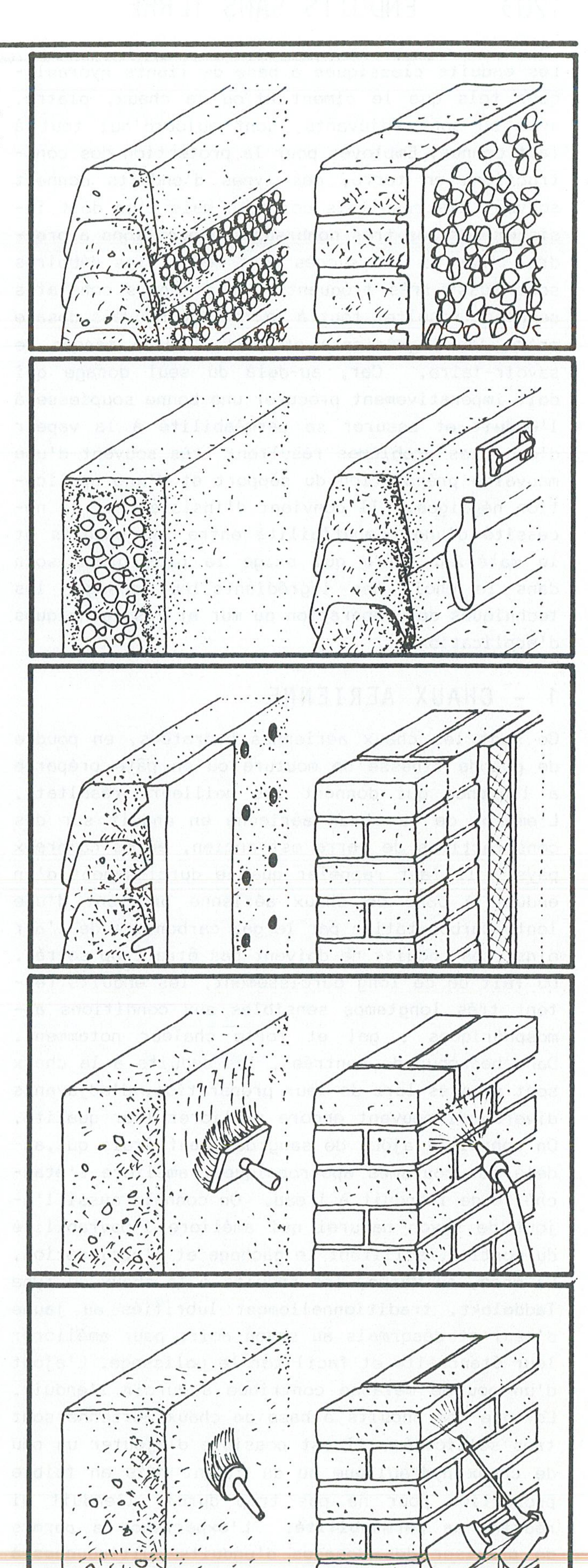
Des éléments de terre cuite type planelles plates ou en "L" sont soit posés en parement du mur en pisé, lors de sa construction (procédé allemand) soit inclus au bloc de terre lors du moulage du bloc (procédé de l'EPFL de Lausanne). Dans ce dernier cas, l'adhérence de la planelle au bloc de terre est assurée par des têtes en queue d'aronde.

5 - BICOUCHES

Il s'agit d'une stabilisation de surface. Sur le pisé, ce peut être une stabilisation intégrale du parement extérieur, dans la banche, ou partielle : filets de mortier de chaux. Le bicouche est aussi développé sur les blocs de terre (Burundi, 1952 et EIER à Ouagadougou) : résultats excellents mais lenteur de production. Sa stabilisation de surface ne s'opère que sur 2 à 3 cm d'épaisseur.

6 - INCRUSTATION

Une couche d'usure extérieure est constituée d'une incrustation d'éléments aussi divers que cailloux ou éclats de pierres, tessons de céramique ou éclats de briques, coquillages, capsules de bouteilles (observé au Mexique) ou culots de bouteilles, couvercles de boîtes (observé à Khartoum). Le travail est fastidieux et très consommateur d'éléments. Seules les parois les plus exposées sont incrustées.



7 - TRAITEMENT DE SURFACE

Le parement exposé est soigneusement traité. Sur le pisé en France, on réalise une "fleur de pisé": le côté extérieur est bien damé avec une terre très fine. Ce peut être aussi un ragréage avec une batte en bois (Maroc). Ce battage extérieur est aussi pratiqué au Yémen sur les constructions en bauge. On peut aussi frotasser la surface du mur avec un galet, p.e. Ces opérations ferment la porosité de la terre et sont efficaces mais doivent être évitées si l'on compte réaliser un enduit.

8 - ENDUITS

Ils peuvent être en terre, en terre stabilisée ou en mortier à base de sable ajouté d'un liant hydraulique, ciment ou chaux,ou d'un adjuvant autre: bitume, résines, etc ... Les enduits peuvent être monocouches épais ou minces, ou multicouches qui sont d'un excellent comportement mais plus long à réaliser.

9 - PEINTURES

Les revêtements classés dans cette rubrique sont bien sûr réalisés à base de peintures classiques mais englobent aussi les badigeons : ce sont des coulis de ciment ou de chaux, appliqué au pinceau sur des parois convenablement préparées et hydratées. Ce peut être aussi une application de bitume sous forme de cut back liquide. On peut également les appliquer au pistolet.

10 - IMPREGNATIONS

La terre est imprégnée de produits naturels (huile de lin p.e.) ou chimiques (silicone p.e.) qui confèrent certaines qualités au mur : imperméabilisation, fixation des petits grains et poussières, durcissement du parement exposé, coloration,etc... Les imprégnations sont soit réalisées à la brosse soit par aspersion.

Les enduits classiques à base de liants hydrauliques tels que le ciment et/ou la chaux, plâtre, avec ou sans adjuvants, sont aujourd'hui tout à fait connus. Employés pour la protection des constructions en terre, ces types d'enduits donnent souvent des résultats corrects mais l'on doit insister sur les très nombreuses précautions à prendre. Car si les succès sont réels, les déboires sont aussi très fréquents. Les échecs constatés semblent résulter tout à la fois de mauvais dosage entre les ingrédients et surtout d'un manque de savoir-faire. Car, au-delà du seul dosage qui doit impérativement procurer une bonne souplesse à l'enduit et assurer sa perméabilité à la vapeur d'eau, les problèmes résultent très souvent d'une mauvaise préparation du support et d'une application négligée. Il convient d'insister sur la nécessité d'une compatibilité entre les enduits et le matériau terre qui exige le plus grand soin dans le choix des ingrédients, leur dosage, les techniques de préparation du mur et les techniques d'application.

1 - CHAUX AERIENNE

Ce sont les chaux aériennes hydratées, en poudre de grande finesse de mouture ou en pâte préparée à l'avance qui donnent les meilleurs résultats. L'emploi de la chaux aérienne en enduit sur des constructions de terre est ancien, en de nombreux pays. Il faut rappeler que le durcissement d'un enduit à base de chaux aérienne provient d'une lente carbonatation par le gaz carbonique de l'air ainsi, ces enduits ne doivent pas être trop serrés. Du fait de ce long durcissement, les enduits restent très longtemps sensibles aux conditions atmosphériques : gel et forte chaleur notamment. Dans beaucoup de contrées, les enduits à la chaux sont amendés lors de leur préparation, d'adjuvants divers qui peuvent encore améliorer leur qualité. On connaît l'ajout de sang de boeuf frais qui, au-delà des coutumes apotropaïques, améliore l'étanchéité de l'enduit à l'eau. On connaît aussi l'ajout de savon naturel qui améliore l'ouvrabilité du mortier, facilitant le gâchage et l'application. De même, au Maroc, les enduits à la chaux du type Taddelakt, traditionnellement lubrifiés au jaune d'oeuf et désormais au savon noir, pour améliorer leur étanchéité et faciliter le polissage. L'ajout d'un peu de mélasse contribue à durcir l'enduit. Lorsque les enduits à base de chaux aérienne sont très sollicités, il est possible d'ajouter un peu de chaux hydraulique ou du ciment mais en faible proportion pour ne pas trop durcir l'enduit ni réduire sa perméabilité. L'expérience a permis de préciser des dosages d'enduits multicouches à base de chaux aérienne et de sable et d'enduits bâtards à base de chaux, de ciment et de sable.

	chaux	ciment	sable
1° couche	1		1-2
2° couche	1		2,5-3
3° couche	1		3,5-4
ou			
1° couche	2	1	3-4
2° couche	2	1	6
3° couche	2	1	8

2 - CHAUX HYDRAULIQUE

On distingue les chaux hydrauliques naturelles et les chaux hydrauliques artificielles. Les naturelles ont les qualités de la chaux et le durcissement qui allie une prise rapide à l'eau et une prise lente à l'air. Cet avantage réduit leur sensibilité à l'humidité et au gel de l'enduit jeune. Les artificielles se rapprochent davantage des ciments et leur emploi doit être évité. Elles peuvent être pratiquées si les dosages restent faibles : 1 chaux pour 5 à 10 sable.

3 - CIMENT

Les mortiers au ciment sont trop rigides et pèchent par défaut d'adhérence sur la terre. On observe fréquemment une pathologie de fissuration, de cloquage et de décollement par plaques. Leur emploi est donc à déconseiller ou ne peut être qu'un pis-aller mais en opérant des dosages très faibles de l'ordre de 1/5-10. Il est préférable de leur ajouter un peu de chaux : 1-1 ou 1-2 si possible. Les enduits au ciment doivent être appliqués sur des grillages qui réduisent leur fissuration et leur décollement par plaques, sans pour autant améliorer leur adhérence.

4 - PLATRE

Les enduits au plâtre sur murs de terre sont assez compatibles avec le support mais davantage en intérieur qu'en extérieur. Les régions de climat sec acceptent leur emploi en extérieur. Il convient de préparer l'adhérence du plâtre sur la terre avec un gobetage à la chaux ou au ciment en badigeon dilué. En extérieur, le plâtre peut être ajouté de chaux aérienne qui durcit l'enduit et améliore sa résistance à l'eau. L'enduit peut être réalisé en 2 couches avec 1 partie de plâtre ajoutée de 0,10 à 0,15 partie de chaux aérienne et 0,75 à 1 partie de sable pour la 1ère couche, avec la même composition de liant, sans sable, pour la 2ème couche. Une imperméabilisation de surface après quelques jours, en solution de fluosilicate est souhaitable.

5 - POUZZOLANE

Ajoutée de chaux, la pouzzolane qui contient assez de silice, donne un composé analogue au ciment portland. Les enduits à base de pouzzolane sont beaucoup plus souples que ceux à base de ciment. Ils sont souvent employés pour la finition de toitures en terre maçonnées, plates ou en voûtes.

6 - GOMME ARABIQUE

Ajoutée à la terre ou mieux avec du sable,la gomme arabique donne de bons revêtements protecteurs, durs et ne fissurant pas, adhérant bien au mur de terre. Ce produit n'est pas très résistant à l'eau aussi est-il préférable de l'employer en intérieur. Les teintes obtenues sont ocre rouge pastel. Ce type d'enduit est notamment utilisé au Soudan mais, la gomme arabique coûte de plus en plus cher.

7 - RESINE

Dans l'état actuel des connaissances, l'emploi des résines, liants organiques et substances minérales diverses, devrait plutôt être limité à un traitement de la couche de finition des enduits précédemment évoqués.

8 - ENDUIT "PRET A L'EMPLOI"

Ces enduits sont confectionnés à partir d'un mortier sec adjuvanté, à base de liants minéraux. Ils sont conçus pour être appliqués sur d'autres supports que la terre en monocouches mais peuvent être d'un emploi intéressant sous garantie d'une préparation adéquate du support. Leur emploi exige une compétence technique et une expérimentation systématique et rigoureuse. Les systèmes mixtes minéraux-organiques avec couche d'imprégnation, mortier de ragréage aux liants minéraux ajoutés de résines et couche de finition aux liants organiques sont aussi dignes d'intérêt sous réserve d'appliquer les principes de base de tout enduit sur mur de terre.

9 - ENDUIT PLASTIQUE

Ils impliquent la non conservation de l'aspect du support. L'incorporation d'armatures aux revêtements d'étanchéité plastiques peut être intéressante suivant la configuration du support. Mais pour ces enduits, le risque de cloquage et le manque de perméabilité à la vapeur d'eau obligent à déconseiller leur emploi.

RENDEMENT

. Préparation du support, grattage + dépoussiérage	1/2 h/J/m²
. Préparation du mortier + aide du manoeuvre au maçon	1/4 h/J/m²
. Application en 3 couches par le maçon	1/4 h/J/m²
. Badigeonnage par 1 ouvrier	1/30h/J/m²
. Supervision d'un contremaître	1/20h/J/m²
TOTAL	1,1h/J/m²

Chiffres constatés sur des chantiers d'envergure dans les pays tropicaux. Rendements sous réserve d'une qualification des équipes et tout corps confondus.

COUT

Il n'est pas trop tributaire du type d'enduit mais plutôt du type d'organisation du travail. Les chiffres suivants correspondent à une organisation en régie ou en coopérative et sont établis sur la base de plusieurs chantiers et couvrent les enduits intérieurs et extérieurs.

Type de construction	% du coût total sans VRD
1. Maison très économique	15 %
2. Maison réduite à équipement minimal	20-25 %
3. Logement "carcasse" (dépouillé)	30 %
4. Chape pour voûtes, dômes	5 %

Dans le cas 1, les 15 % s'entendent y compris incorporation éventuelle de treillis métallique. Le prix de revient se décompose comme il suit : matériaux, 8 %; matériel, 8 %; organisation, 8 %; salaires, 76 %. Le coût de la main d'oeuvre peut atteindre 80 à 90 %. La difficulté du chantier peut entraîner des variations du simple au double. Dans le cas 2, l'équipement minimal s'entend : pas d'électricité,1 point d'eau,minimum de pièces, pas de revêtement de sol, pas de faux plafond. Dans le cas 3, la valeur indiquée de 30 % n'est pas irraisonnable même si les logements sont tout à fait dépouillés.
Dans le cas 4, il s'agit de chape d'étanchéité.

La terre peut certes constituer un excellent enduit ou être l'un des ingrédients d'un enduit. Mais la terre ne saurait constituer le composant de base d'un enduit extérieur de première qualité, surtout dans des environnements pluvieux, sans être améliorée par l'apport d'un adjuvant stabilisateur. Les enduits de terre ont été largement employés et le demeurent, en maintes régions du monde.
Les enduits de terre, employés en extérieur, comme en intérieur, sont d'une adhérence quasiment parfaite mais constituent avant tout une couche d'usure qui sera la première affectée par l'érosion et qui pourra être remplacée à l'économie. Une simple imprégnation, un badigeon ou un coulis, une peinture, peuvent considérablement améliorer ces enduits au demeurant fragiles. L'enduit de terre est souvent désigné par le terme "dagga", dont l'emploi généralisé dans la littérature porte fréquemment à confusion.

1 - TERRE

Utilisée en enduit, la terre sera débarrassée de tous ses éléments de ø 2 mm. On emploiera de préférence des terres argileuses et sableuses (1 part d'argile pour 2 à 3 parts de sable). Des essais préalables sont souhaitables pour apprécier cette juste proportion de sable entre 2 et 3 parties; ces essais porteront sur l'évidence des craquelures à quelques jours et sur l'adhérence. Les argiles caractérisées par un fort gonflement et un retrait élevé ne conviennent pas. Ce sont plutôt des argiles du type kaolinite qui sont préférables. Les argiles latéritiques font souvent des enduits acceptables d'une belle teinte rouge ou ocre. La fissuration est le défaut principal de ces enduits à base de terre.

2 - EAU

On n'observe pas de problèmes majeurs avec l'eau de gâchage si ce n'est le contrôle de la quantité afin de maîtriser le retrait et le séchage de l'enduit. Il a été possible de constater que l'emploi de l'eau de pluie est plus favorable, car cette eau est dépourvue de cations et les ions Na fixés sur le complexe argilo-humique repassent en solution et provoquent 2 réactions qui aboutissent à la fixation d'ions OH^- élevant le PH jusqu'à 10. L'abondance d'ions OH^+ disperse l'argile qui devient plus collante. D'autres améliorations sont possibles en ajoutant à l'eau des défloculants ou agents disperseurs. On peut ainsi employer moins d'eau et obtenir un mélange dispersé très homogène et moins sujet au retrait, pouvant sécher plus rapidement. Les principaux défloculants sont la soude (Na_2CO_3) et le silicate de soude ($Na_2O \times SiO_2$), tous deux ajoutés en proportion de 0,1 à 0,4 % de l'argile; l'acide humique, l'acide tannique et l'urine de cheval p.e. qui peut intégralement remplacer l'eau.

3 - FIBRES

Elles jouent le rôle d'armatures. De toutes sortes, ces fibres sont végétales, pailles de blé, d'orge, d'escourgeon, de riz, de mil; ou animales, crins d'animaux divers; ou même artificielles comme des fibres de polypropylène. Les dosages courants sont de l'ordre de 20 à 30 kg de fibres par m³ de terre mis en oeuvre. Dans la plupart des enduits en terre armés de fibres, celles-ci sont coupées en brin assez courts. Les couches de finition peuvent être aussi armées de fibres donnant à l'enduit une texture agréable mais retenant les poussières. On peut également incorporer des fibres sous forme de charge légère, fins copeaux broyés ou sciure de bois. Les charges de déchets de bois doivent auparavant être minéralisées par un trempage dans un lait de chaux ou de ciment.

4 - STABILISATION

Quasiment tous les produits utilisés pour la stabilisation dans la masse de la terre conviennent à la confection d'enduits.

5 - STABILISATION AU CIMENT

Elle n'est vraiment efficace que si la terre est très sableuse. Les dosages peuvent varier de 2 % à 15 % de ciment, selon ce que l'on souhaite obtenir, soit une légère amélioration, soit une véritable stabilisation. Les enduits stabilisés au ciment doivent de préférence être appliqués sur des supports stabilisés. Il est aussi possible d'ajouter en plus 2 à 4 % de bitume; ce mélange assombrit un peu l'enduit sans dénaturer la teinte mais améliore très sensiblement la résistance à l'eau.

6 - STABILISATION A LA CHAUX

Elle n'est vraiment efficace que si la terre est assez argileuse et pour des dosages importants, souvent supérieurs à 10 %. De même, l'enduit stabilisé à la chaux doit de préférence être appliqué sur des supports stabilisés. L'ajout d'urine animale ou d'excréments animaux peut accroître la qualité de l'enduit de façon étonnante (moins de retrait, dureté et bonne perméabilité) mais offre le désavantage de dégager une forte odeur d'ammoniaque lors du mélange, qui peut indisposer.

7 - STABILISATION AU BITUME

Les terres stabilisées au bitume ne sont ni trop argileuses ni trop sableuses et pulvérisées. La quantité de bitume varie de 2 à 6 %. Ce sont généralement des cut back qu'il faut préalablement chauffer sans trop élever la t° (max. 100°C). Dans le cas d'emploi d'émulsions bitumineuses, le mélange doit être pratiqué lentement afin de ne pas provoquer une rupture de l'émulsion. La préparation du stabilisant peut consister en un mélange de 4 parts de bitume + 1 part d'huile kérosène, chauffé et ajouté de 1 % de cire paraffine.L'huile kérosène peut être remplacée par du créosote de houille. Le mélange sus défini peut être remplacé par 4,5 parties de cut back ou 3,5 parties d'émulsion bitumineuse. La stabilisation au bitume pour la réalisation d'enduits est particulièrement efficace sur une terre déjà armée de paille et même ajoutée d'excréments animaux. Le bitume n'est ajouté qu'à la fin, 2 ou 3 heures avant application de l'enduit. Des mélanges d'asphalte, de gomme arabique et de soude caustique en solution sont aussi très efficaces. Le support doit bien être préparé, brossé et humidifié. D'excellents résultats avec ce genre d'enduits ont été obtenus par le CBRI de Roorkee en Inde.

8 - STABILISANTS NATURELS

Ils sont très divers et souvent employés par coutume en de nombreux pays. Leur efficacité est très variable; ils agissent plus comme des ralentisseurs de la dégradation du matériau, sans assurer pour autant la pérennité de l'enduit mais limitent les réfections. Les stabilisants classiquement utilisés sont : le jus de cactus agave ou de cactus optuntia; le beurre de karité fondu, souvent ajouté de gomme arabique; le jus de tiges bouillies de bananier; 15 l de farine de seigle bouillie dans 220 litres d'eau puis la pâte obtenue est ajoutée à la terre; de la bouse de vache ou de crottin de cheval (1 part pour 1 part d'argile et 5-15 parts de sable); la gomme arabique qui forme avec l'eau des colloïdes; la sève des fruits de l'acacia scorpioides (gonahier) qui est bouillie dans de l'eau avec quelques pierres de limonite (sous-espèce de latérite) et qui donne un tannin hydrofuge assez efficace; le latex d'euphorbe précipité avec de la chaux, le néré en jus, obtenu par décoction de la poudre des fruits, ajouté à la terre puis repassé en badigeon sur la couche d'enduit de terre stabilisé au néré; le savon de peulh, sorte de caséine délayée et battue comme une pâte. D'autres produits naturels ont été testés par le Centre de Cacavelli, du Togo, pour améliorer les enduits : l'huile de kapok obtenue par torréfaction des graines de kapok sous forme de poudre concentrée en lipides. La poudre est ensuite délayée dans de l'eau et bouillie plusieurs heures. le mélange à la terre est d'abord réalisé à sec puis l'on ajoute l'eau de gâchage. Le mur enduit est badigeonné de 2 couches d'huile de kapok. Le palmitate de calcium, obtenu à partir d'un mélange de chaux grasse et d'acide palmitique - produit de la réaction de HCl sur une solution de savon indigène : l'akoto. Le palmitate de calcium est délayé dans un petit volume d'eau et le gâchage avec la terre se fait avec le lait de chaux obtenu (10 % du poids du mélange). Chez les Hansa d'Afrique, on a pu constater l'emploi de potasse naturelle extraite des fosses à teinture, ou d'infusion de gousses de caroubier, ou même de mimosa que les plus riches importaient d'Egypte. Il existe sans doute de très nombreux autres stabilisants naturels.

9 - STABILISANTS CHIMIQUES

Ils sont très divers et leur efficacité, pour la plupart, non encore confirmée scientifiquement : les cellulosiques, l'acétate de polyvinyl,le chlorure de vinyl, les acryliques, le silicate de soude, les amines quaternaires, l'aniline et la bentonite, les stéarates des savons, des colles de caséine, la paraffine. Ce peuvent être aussi des produits composés des précédents et éventuellement ajoutés à des produits naturels.

10 - APPLICATION DES ENDUITS EN TERRE

Utilisés en intérieur, ils donnent d'excellents résultats mais il est conseillé d'enduire les points faibles avec un mortier de sable et de chaux (angles, coins, embrasures, bas de murs). En extérieur, 1 seule couche ne suffit pas; il faut 2 couches minimum, 3 de préférence: 1 gobetis en terre argileuse très adhésive que l'on peut terminer avec un mortier chaux/sable 1-1; 1 crépi épais de 1,5 cm en terre argileuse et gros sable et armé de fibres hachées en brins de 3 à 5 cm; 1 couche de finition en terre argileuse et sable ajoutée d'une charge légère (balle ou lin p.e.).

PEINTURES OPAQUES

La gamme des peintures du commerce est très étendue. On peut néanmoins d'emblée affirmer que les peintures ordinaires utilisées en revêtement de murs de terre non stabilisée donnent au début des résultats satisfaisants, d'apparence, mais que très vite apparaissent des dégradations telles que cloques, décollements. La peinture ne peut donc être considérée comme un moyen permettant de donner au mur de terre une finition durable. Elle permet toutefois une protection temporaire qui exigera des réfections soignées. Leur emploi peut être retenu en application intérieure et pour des murs extérieurs s'ils sont très abrités des agressions de l'environnement naturel. Il est néanmoins préférable de les utiliser en complément de la couche de finition des enduits. La surface du mur destiné à être peint doit être parfaitement sèche et dépoussiérée à la brosse. Par ailleurs, les peintures primaires qui pénètrent en profondeur donnent des résultats médiocres. Il est préférable de réaliser une couche d'imprégnation, soit à l'huile de lin, soit à la peinture au plomb très diluée, à un taux de 0,50 l/m². Pour la couche de finition (2 couches), il est souhaitable de consulter un fabricant de peinture en vue de bénéficier de ses conseils techniques.

Pour des murs stabilisés au bitume, il convient de réaliser 2 à 3 couches de peinture au minimum car des exsudations de bitume peuvent apparaître. Lorsque les conditions de qualité du produit, de bonne préparation du support et de bonne méthode d'application sont réunies, la durabilité d'une peinture en extérieur peut être de 3 à 5 ans. Des expériences américaines montrent que les résultats sont meilleurs sur des murs de terre plus sableux qu'argileux.

1 - PEINTURES INDUSTRIELLES

Les peintures d'aluminime ne tiennent pas bien en application directe sur la terre. Elles peuvent être employées sur une couche de fond traité au bitume ou sur un mur stabilisé au bitume.

Les peintures à la caséine donnent des résultats assez satisfaisants sur les murs de terre.

Les peintures d'apprêt peuvent être employées en imprégnation.

Les peintures au plomb peuvent être utilisées sur un support traité à l'huile de lin.

Les peintures à l'huile sont médiocres.

Les émulsions d'acétate de polyvinyl peuvent parfois être satisfaisantes.

Les peintures à la détrempe ne sont pas applicables sur des murs friables.

Les peintures latex sont assez efficaces sur des murs de terre stabilisée.

Les peintures résines sont souvent satisfaisantes alors que les peintures au silicone ne sont pas très fiables.

Les peintures à l'acrylique sont respirantes, élastiques, hydrofuges et résistent bien à l'alcalinité des murs de terre.

Par contre, les peintures étanches, alkydes, époxy, polyuréthanes sont à proscrire car elles retiennent l'humidité.

Les peintures de caoutchouc chloriné, élastiques, résistantes à la chaleur, à l'ultraviolet et aux conditions atmosphériques peuvent être employées en étanchéité de toitures mais pas sur les murs de terre.

2 - HUILES

Les murs de terre sont des supports très poreux qui absorbent de grandes quantités d'huiles non oxydantes, telles les huiles de vidange; celles-ci ne sont donc pas satisfaisantes car les couches d'imprégnations ne doivent pas être pénétrantes. L'huile de lin qui est oxydante, réagit à l'air et se fige. Elle est peu soluble dans l'eau et peut être appliquée sur un mur de terre humide. Elle est très satisfaisante comme couche d'apprêt pour les peintures au plomb et à l'huile mais demeure chère. L'huile de ricin a les mêmes propriétés mais elle est rare et très chère. Il est possible que l'huile de poisson soit également bonne. L'huile de palme et l'huile de karité ont fait l'objet d'essais en Côte d'Ivoire mais sont très visqueuses, difficiles à appliquer et donnent lieu à l'apparition d'efflorescences.

3 - SEVES DE PLANTES

Le jus d'euphorbe lactea est très connu dans les pays tropicaux. On peut l'utiliser en revêtement de mur de terre mais il est impératif de lui ajouter de la chaux (précipitation). Les jus de cactus agave et optuntia peuvent être employés mais sont très toxiques et dangereux pour les yeux. En Haute-Volta et au Bénin, au Ghana Septentrional, on emploie un extrait végétal connu sous le nom de "am" (couleur rouge). Dans le Nord du Nigéria, on emploie le "laso", extrait d'une vigne locale dénommée "dafara" (vitis pallida) et le "makuba" qui est un extrait de gousses de caroubier. Le jus de bananier peut être employé mais doit bouillir très longtemps, consommant beaucoup de combustible; son efficacité n'est pas assurée.

4 - AUTRES PRODUITS NATURELS

On peut aussi réaliser des peintures à partir de colles au fromage blanc (6 parts) ajouté de chaux vive (1 part) et très diluée dans l'eau. Egalement des peintures au petit lait avec 2 kg de ciment blanc et 4 litres et demi de petit lait. Ces recettes ont été mises au point par l'Université du "South Dakota".

5 - TERRE

Les barbotines de terre peuvent être employées en intérieur et ajoutées de substances fixatrices. Les barbotines permettent de fixer les poussières et d'égaliser les surfaces. En extérieur, elles ne sont pas durables mais peuvent être améliorées par une stabilisation aux liants minéraux (chaux, ciments) ou organiques (bitumes, sèves et huiles diverses) ou d'acides. Même améliorées, ces barbotines devront être régulièrement refaites dans la plupart des cas.

PRODUITS TRANSPARENTS

On observe une forte tendance actuelle à l'emploi de ce genre de produits qui ont l'ambition de conserver la terre indéfiniment et qui préservent l'apparence du matériau. Mais la terre est un support très différent des autres matériaux industriels et les résultats obtenus avec ces produits "magiques" sont très aléatoires car les conditions réelles ne sont pas celles des laboratoires. De nombreux problèmes apparaissent après quelques années.
La chimie et la composition de ces produits sont très complexes et il convient de réaliser des tests préalables en vue de s'assurer de leur efficacité, au moins à moyen terme et pour des conditions extérieures simulées assez dures. Beaucoup de ces produits qui sont dits d'étanchéité totale ne résistent pas à une faible pression d'eau.
En règle générale, ces produits transparents contribuent à ralentir la dégradation du mur au niveau de sa couche d'usure. Leur qualité dépend de la profondeur de pénétration (jusqu'à 2 cm minimum). Ces produits peuvent former une croûte de sol traité qui se désolidarise du mur par la suite; c'est le cas du silicate de sodium et des silicones en général.
En l'état actuel de la connaissance de ces produits à base de paraffine, de cire, de résines, de substances minérales diverses, leur emploi devrait plutôt être limité à un traitement de la couche de finition des enduits épais et sur des façades peu exposées.

1 - HYDROFUGES DE SURFACE

Les silicones en solution dans un solvant volatil nécessitent un support bien sec et leur emploi est limité par les fissures qui ne peuvent être supérieures à 0,15 mm, surtout sur les façades exposées. Leur emploi ne peut être envisagé qu'en traitement de finition des enduits.
Les silicones en solution ou émulsion aqueuse peuvent s'accomoder d'une certaine humidité du support mais justifient les mêmes réserves que les précédents.
Les savons métalliques, stéarates, polyoléfines doivent faire l'objet d'une étude préalable.
Les fluates ou fluosilicates forment un calcin artificiel par réaction avec le carbonate de calcium. Leur action est nulle sur une terre stabilisée à la chaux. Ils peuvent avoir une bonne efficacité sur enduits carbonatés de mortiers à la chaux.

2 - IMPREGNATIONS SEMI-FILMOGENES DE RESINES

Elles peuvent être intéressantes sur les façades peu exposées si elles permettent une forte absorption dans les premiers millimètres de la terre et si elles ne forment pas une croûte épaisse en surface. Il convient de s'assurer de la préservation de la perméabilité à la vapeur d'eau et de la possibilité de réfection.

3 - REVETEMENTS D'IMPERMEABILISATION

Ils sont à base de résines en solution organique ou en dispersion aqueuse et ont une efficacité compromise par les fissures existantes ou à venir du support. Les risques de cloquage et de défauts de perméabilité à la vapeur d'eau rendent leur emploi très aléatoire. Ils sont déconseillés à priori.

Les badigeons à la chaux aérienne sont largement utilisés depuis les temps immémoriaux, en maintes contrées. Ils constituent une protection contre l'influence néfaste des pluies plutôt économique, notamment en l'absence de matériaux sophistiqués et pour de fortes contraintes budgétaires. Ces badigeons sont plus appropriés à des revêtements intérieurs ou extérieurs peu exposés mais il est très possible de les améliorer et de porter leur durabilité à plusieurs années.

1 - DESAVANTAGES

Ces badigeons sont peu durables car facilement délavés. Les plus rudimentaires exigent des réfections périodiques (1 à 2 fois l'an), surtout en climat humide. L'apport d'adjuvants les améliore très sensiblement; ce sont par exemple les huiles végétales siccatives (huile de lin, de noix, de ricin, de croton, de chènevis), les colles, la caséine, des sels plus ou moins hydratés (sulfate de zinc, alun de potasse, chlorure de sodium), résines ou oléo-résines et gommes ou gommes-résines solubles dans l'eau. Ces badigeons sont aussi très sensibles aux chocs mécaniques et n'offrent qu'une protection limitée à l'abrasion.

2 - AVANTAGES

Les badigeons à la chaux aérienne sont économiques et résistent assez bien à l'alcalinité ainsi qu'à l'exsudation de bitume (sur murs stabilisés au bitume). De couleur claire, ils réfléchissent le rayonnement solaire. Ils peuvent être colorés facilement (oxydes). Leur application est aisée et rapide et n'exige pas une main-d'oeuvre spécialisée bien qu'elle doive être soignée. Leur réfection est aisée et leur vieillissement ne provoque pas de dégradation importante du support. Cette réfection périodique rajeunit la construction. Ils offrent l'avantage de réguler les échanges hydriques entre le support et l'ambiance. Compte tenu de quelques-uns de leurs constituants (chaux aérienne vive ou éteinte, sels, formaldéhyde), ils ont des propriétés antiseptiques certaines. Ils apportent la clarté et l'hygiène à beaucoup de taudis misérables et malsains.

3 - LIANT

Les meilleurs résultats sont obtenus avec de la chaux aérienne éteinte en pâte, à partir de chaux vive à haut rendement et finement tamisée. La préparation s'effectue plusieurs jours avant l'application. On peut aussi employer une chaux aérienne éteinte commerciale sous réserve que la carbonatation ne soit pas avancée. La teneur en oxydes de calcium et de magnésium ne doit pas être inférieure à 80 %, la teneur en dioxyde de carbone n'excèdant pas 5 %.

4 - PREPARATION DU LIANT

Les récipients ou fosses employés pour l'extinction de la chaux vive doivent être trop grands car il se produit un important foisonnement (le volume double). On fera attention aux risques de brûlure car l'extinction de la chaux vive dégage une forte chaleur (120 à 130°C). On éteint de préférence de nuit (fraîcheur) avec de l'eau claire en quantité suffisante; tous les morceaux sont brisés et la chaux bien mélangée jusqu'à obtenir une pâte homogène que l'on portera à la consistance voulue en ajoutant de l'eau en quantité utile. Si l'on emploie de la chaux déjà éteinte, on s'assure de la qualité du tamisat. Le mélange de base se fait avec 1 vol. de chaux éteinte pour 1 vol. d'eau. La consistance désirée peut nécessiter l'ajout d'eau.

5 - MISE EN OEUVRE

Le badigeon est appliqué sur un support propre et dépoussiéré, non friable, en au moins 2 couches (3 ou 4 de préférence), claires au début puis de plus en plus consistantes, au pinceau à badigeon (1ère couche)puis au balai ou même à la tyrolienne (autres couches). On attend environ 24 h entre les couches. L'application se fait sur mur à l'ombre et l'on évite les conditions de grand froid ou de forte chaleur sèche. Il faut aussi se préserver d'une éventuelle averse qui risque de délaver le badigeon. L'application "à la fresque" est la meilleure méthode mais délicate à exécuter sur les murs de terre. L'application à sec sera donc souvent utilisée et l'on prendra soin d'humidifier le support, de préférence avec un lait de chaux clair, sans saturer le support. Les couches trop épaisses s'écaillent. Le séchage doit être lent.

6 - ESSAI SOMMAIRE

Un bloc pesé au préalable puis vêtu de 2 couches de badigeon est immergé 2 jours puis pesé à nouveau; quelques dizaines de gr. de différence : badigeon valable; quelques centaines de gr. de différence : à proscrire.

7 - CHARGES

Ce sont des adjuvants apportés au liant qui confèrent au badigeon des qualités que le liant seul ne peut fournir. Les charges présentées ici sont toutes compatibles avec la chaux.

- **HUILE DE LIN** : augmente la résistance aux variations d'humidité et l'adhérence au support. A ajouter juste avant l'emploi du badigeon.

- SUIF : graisse animale composée de glycérides; donne une souplesse à l'application du badigeon, en augmente la résistance à l'eau et l'adhérence. Dosage : environ 10 % de suif fondu en poids de chaux. Peut être remplacé par de la stéarate de calcium en poudre ou de l'huile de lin.

- LAIT ECREME : ou petit lait égoutté (10 jours); augmente l'imperméabilité du badigeon. Ajouter juste avant l'emploi du badigeon; 1 part pour 10 parts d'eau de préparation du badigeon.

- COLLE DE CASEINE : en poudre; connue sous le nom de "colle à froid". Joue un rôle de fixatif. L'addition de fornaline augmente sa résistance. Dissoudre cette colle dans de l'eau bouillante jusqu'à ce qu'elle soit molle (2h) à raison de 2,5 kg de colle pour 7 litres d'eau.

- COLLES ANIMALES : améliorent l'adhérence du badigeon; p.e., colle de peau, colle d'os.

- FARINE DE SEIGLE : forme une colle végétale soluble dans l'eau chaude; nécessite l'ajout de sulfate de zinc comme préservatif de la pâte. Augmente la dureté de surface et la résistance au frottement.

- ALUN :sulfate double de potassium et d'aluminium hydraté. En ajoutant très peu, broyé et cuit dans de l'eau bouillante (1h), rendu pâteux juste avant emploi du badigeon. Augmente les qualités de travail, la dureté de surface et la résistance au frottement du badigeon.

- CHLORURE DE SODIUM : ou sel; retient l'humidité dans le badigeon, facilite la carbonatation de la chaux. A ajouter longtemps avant emploi du badigeon (dissolution). On emploie aussi des sels calciques ou du phosphate trisodique.

- FORMALDEHYDE : propriétés antiseptiques et stabilisantes de l'urée-formol. Dissoudre dans l'eau et ajouter doucement au mélange chaux-colle caséine/trisodium phosphate; ne se garde pas.

- MELASSE : résidu sirupeux de la cristallisation du sucre; ajouter 0,2% du poids de chaux. Accélère la carbonatation et augmente la résistance.

- CHARGES MINERALES : fillers inertes ou terre (kaolin).

- COLORANTS : exclusivement minéraux, en poudre détrempée, infusée préalablement.

RECETTES DE BADIGEONS

		CHAUX VIVE CaO								CHAUX ETEINTE Ca(OH)								
		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
CHAUX VIVE	(2)	20	20	20	20	20	20	20	20									
CHAUX ETEINTE	(2)									25	25	25	25	25	25	25	25	25
CIMENT C.P.A.		2																25
EAU	(1)	40	40	40	40	47	49	50	60	30	30	32	32	40	63	63	65	50
HUILE DE LIN	(1)											1					1	
SUIF FONDU						2		1,2										
LAIT ECREME	(1)		6,5															
CASEINE											2,5							
COLLE ANIMALE				1,4														
FARINE DE SEIGLE							0,8											
ALUN					1								0,6		0,6	0,6	0,2	
CHLORURE DE SODIUM		5	0,7				0,8								1,3	2,5		
SULFATE DE ZINC			0,3															
PHOSPHATE TRISODIQUE											1,5							
FORMALDEHYDE	(1)										1,9							
MELASSE	(1)														7,8			
APPRECIATION			D			D					D				D	D		D

1) Toutes les données sont en kilogrammes, à l'exception des liquides pour lesquels elles sont fournies en litres.
2) Les quantités de référence choisies correspondent sensiblement à : 20 kg chaux vive = 25 kg de chaux aérienne éteinte.
3) D indique que le badigeon est assez durable.

BADIGEONS DE CIMENT OU DE CHAUX HYDRAULIQUE

De simples badigeons de ciment ou de chaux hydraulique confèrent une bonne protection et une meilleure durabilité aux murs de terre. Ils sont en général faisables à moindre frais et ne sont pas altérables par l'alcalinité du mur. Pour de bonnes conditions d'exécution, ils peuvent contribuer à réduire la quantité de stabilisant dans la masse du mur. Le durcissement de ce genre de badigeons réclame une ambiance humide et la cure de séchage doit être soignée. Ils sont donc plus délicats à mettre en oeuvre que des badigeons à la chaux aérienne. Compte tenu de la moindre finesse de mouture des ciments et des chaux hydrauliques par rapport à la chaux aérienne, le dosage en eau sera réduit avec un rapport ciment/eau de l'ordre de 1 à 1,5 contre 0,78 pour la chaux aérienne. De ce fait, la maniabilité et la couvrance sont moindres. Ces badigeons sont relativement étanches à la vapeur et ne conviennent que pour des régions qui ne connaissent pas de problèmes de migration de la vapeur d'eau, de l'intérieur vers l'extérieur (excellents en zone intertropicale). Leur longévité est limitée à 5 à 10 ans (sur des murs stabilisés) et il ne faut donc pas exclure des réfections périodiques. Il existe aussi des peintures à base de ciments blancs diversement colorés et ajoutés de matières qui augmentent leur plasticité. Ces peintures ne sont valables que pour des murs de terre stabilisés ou très résistants où les résultats sont même rarement satisfaisants. Sur des murs peu résistants, ces peintures au ciment sont à proscrire (écaillage, cloquage). D'une manière générale, les murs stabilisés destinés à recevoir un badigeon de ciment ou de chaux hydraulique doivent être préparés (trous et fissures rebouchés, dépoussiérage) et humidifiés à fond. Cette humidification est indispensable lorsque le mélange ne contient pas de chlorure de calcium (sel rétenteur d'eau) dont l'emploi se justifie en région chaude et sèche (à raison de 5 % maximum du mélange). L'humidification facilite l'application, empêche un retrait hydraulique trop rapide mais peut diminuer l'imperméabilité du badigeon. L'ajout de chaux hydraulique au ciment (max. 25 %) n'apporte rien à la qualité du badigeon mais facilite l'application (meilleure plasticité). Les badigeons de ciment ou de chaux hydraulique doivent être réalisés en 2 couches minimum, de 1 à 1,5 mm, 3 ou 4 couches de préférence. La 1ère couche est réalisée au pinceau (pas trop dur) et la 2ème et les suivantes peuvent être appliquées au balai ou au pistolet.

Si le fond est lisse, on applique d'abord une couche diluée d'imprégnation ou d'accrochage et ensuite une couche épaisse; l'inverse si le fond est brut. Les murs sont badigeonnés lorsqu'ils sont à l'ombre. Dès que la couche passée est sèche il faut l'humidifier pour hydrater le ciment et cette opération est répétée en fin de journée. La 2ème couche est appliquée au plus tôt 12h après la 1ère et si possible à 24h d'intervalle, sur une 1ère couche réhumidifiée. Les badigeons sont utilisés dans les 2h suivant leur préparation et les restes ne sont jamais réutilisés le lendemain. Il est possible de rajouter des colorants (3 à 7 % d'oxydes divers) ou des hydrofuges mais plutôt dans la dernière couche. L'hydrofuge peut être du stéarate de calcium à raison de 2 % du ciment ou une solution de sulfate de cuivre à raison de 100 gr pour 10 l d'eau. Il est indispensable de rappeler qu'un badigeon au ciment mal appliqué, sur un mur mal préparé et mal humidifié aura tendance à peler, à s'écailler, à cloquer, perdant toute sa vertu protectrice, sans compter l'aspect dégradé qu'il donnera à la construction.

RECETTES

- 1 - 100 parts de ciment Portland pour 50 parts de sable siliceux fin ou tout autre sable gréseux fin. 4 % de la quantité de ciment en chlorure de calcium en poudre. 2 % du volume de ciment en stéarate de calcium (hydrofuge). Le sable est ajouté après le mélange de ciment + chlorure de calcium + stéarate de calcium. La quantité d'eau est à peu près égale en volume à la quantité de ciment mais peu varier selon les conditions locales.

- 2 - Barbotine de terre latéritique, de ciment et d'eau (Côte d'Ivoire). 2 brouettes de 50 l de terre latéritique, 1 sac de ciment et 175 l d'eau. Rendement de l'ordre de 2,5 kg de barbotine par m² couvert soit 340 gr de ciment,donc peu onéreux.

BADIGEONS DE BITUME

Les murs de terre dont la surface a été correctement préparée (ponçage des aspérités, brossage, dépoussiérage) et parfaitement sèche, peuvent être revêtus d'un badigeon de produits bitumeux tels qu'émulsions, cutbacks, flintkote, etc... Les conditions climatiques locales sont très importantes car ces produits sont assez étanches à la vapeur. Par ailleurs, l'efficacité des produits bitumeux en traitement de surface n'est pas très durable et l'on veillera à réaliser des réfections périodiques. Néanmoins, ces traitements à base de produits bitumeux sont parmi les moins onéreux et améliorent très sensiblement la résistance à l'érosion de l'eau et à l'abrasion de surface des murs de terre. La sécheresse du support est une condition indispensable au succès de ces revêtements bitumeux; dans le cas d'une humidité du support apparaîtront très vite des cloquages et boursoufflures qui se traduiront par des décollements, voire des arrachements de matériau. Ces revêtements bitumeux sont très contestés du fait de leur couleur sombre, voire noire. Cet inconvénient peut être résolu par la réalisation d'un traitement de finition. Ce peuvent être des couches de peinture ou des badigeons à base de ciment ou de chaux,ou de lait de chaux ajouté d'une colle animale. Ces finitions devront être réalisées plusieurs mois après le traitement du mur au bitume afin de s'assurer de la qualité du revêtement bitumeux primaire et pour éviter les exsudations de bitume. Les applications de couches de peinture en finition et notamment de peinture à l'huile sur un mur stabilisé au bitume ou dont la surface a été bitumée, devront prévoir une couche secondaire de peinture d'aluminium à base de bitume. Cette base est compatible avec l'émulsion du mur : les paillettes d'aluminium se déposent en se recouvrant, ce qui évite l'exsudation de bitume du mur. Des traitements de finition immédiats peuvent être envisagés tel qu'un sablage de sable lavé sur le traitement bitumeux frais. En règle générale, l'étude des produits employés en finition des murs stabilisés au bitume fait ressortir que les produits appliqués au pinceau tels que lait de chaux, émulsions bitumeuses, acétate de polyvinyl, émulsions de styrène, restent très perméables à l'eau mais résistent à l'exsudation de bitume. Les peintures à la détrempe et les émulsions d'alkydes ne sont pas conseillées. Les peintures à l'huile résistent à l'eau mais ne s'opposent pas très bien à l'exsudation. Les peintures au bitume sont satisfaisantes des deux points de vue.

RECETTES

- 1 - Peinture au goudron de charbon : mélanger 1 vol. de ciment Portland, 1 vol. de pétrole et 4 vol. de goudron de charbon. Ce goudron ne nécessite pas de préchauffe. Le ciment et le pétrole sont d'abord mélangés puis l'on ajoute le goudron de charbon. Le mélange est appliqué à la brosse sur une couche primaire fine constituée d'un mélange d'eau et de goudron de gaz. La teinte est noire.

- 2 - On peut réaliser un badigeon de liquide bitumeux consistant en 2 vol. de benzol brut et 1 vol. de bitume dissous dans de la benzoline,ajouté d'un peu de résine et de chaux vive. Application à la brosse ou en projection fine. Teinte brune.

- 3 - On peut aussi préparer un mélange de 25 kg d'asphalte préchauffé et de 50 litres d'huile de pétrole. L'asphalte est déversée dans l'huile par petites quantités et soigneusement mélangé jusqu'à dissolution complète. Le mélange une fois refroidi est tamisé finement dans un autre fût pour éliminer toute fraction non dissoute ou tout corps étranger. L'application peut être réalisée à la pompe à pesticide ou insecticide au rythme de 100 m²/jour/personne. La teinte est gris sombre. Une finition au lait de chaux ajouté d'une colle animale dissimule cette teinte indésirable.

La pathologie des enduits sur murs de terre décrit de nombreuses avaries dont les mécanismes sont pour l'essentiel liés à l'influence des conditions climatiques du milieu ambiant : pluie, gel, forte chaleur, mais aussi à l'influence de l'homme : manque d'entretien, manque de savoir-faire quant à leur application, chocs mécaniques. L'observation des enduits fait apparaître :
Soit des enduits en bon état : ils sont anciens et bien entretenus, ou nouveaux et peu âgés (moins de 5 ans), récemment appliqués.
Soit des enduits en mauvais état : anciens, ils peuvent avoir 50 ans d'âge et leur durabilité est alors louable voire même enviable par rapport à des enduits modernes; ce sont pour la plupart des enduits à la chaux aérienne. Les nouveaux enduits en mauvais état présentent une pathologie souvent dévastatrice à moins de 5 ans, laps de temps minimum pour juger de la qualité d'un enduit. Ce sont souvent des enduits au ciment. On observe en effet que le ciment a eu tendance à remplacer le savoir-faire lié à la pratique des anciens enduits. Le ciment a pu améliorer certains problèmes (vitesse d'application, fiabilité p.e.) mais n'a pas réellement apporté de solutions durables. La perte de savoir-faire ancien et le manque de savoir-faire actuel sont donc une cause pathologique majeure. De même, l'entretien de la maison. Autrefois, les enduits étaient plus considérés comme des couches d'usure que l'on entretenait périodiquement (réfection des badigeons p.e.). Il semble que l'entretien de la maison soit peu à peu exclu des pratiques sociales, dans la plupart des pays nantis. Le relais est pris par une confiance excessive accordée à certains produits (ciment,peintures p.e.). Dans beaucoup de pays en développement, l'entretien des constructions demeure un lien social important au sein des collectivités; la réfection régulière de l'enduit des mosquées, au Mali, par la collectivité en fête, en est une illustration.

1 - DEFAUTS ET RAISONS

La pathologie classique peut aller d'une simple salissure (inconvénient esthétique) à une altération de la matière. Les principaux défauts sont : mauvaise composition, manque de souplesse ou d'adhérence au support, mauvaise étanchéité. Les principales raisons en sont: l'emploi de matériaux inadéquats, une mise en oeuvre peu soignée, des tensions structurelles, un manque d'entretien ou même une construction inadaptée (tassement, fissures p.e.).

2 - SYMPTOMES

La pathologie des enduits sur murs de terre laisse observer des symptômes ou avaries assez classiques et ce sont :

- **EFFRITEMENT** : l'enduit se raye à l'ongle et se désagrège. On l'observe pour l'essentiel aux endroits accessibles : tableaux de portes et fenêtres p.e.

- **EROSION** : les enduits érodés sont amincis et ne protègent plus le mur. L'érosion peut être uniforme et l'enduit de plus en plus mince tend à disparaître. L'érosion peut être localisée et l'enduit n'existe plus que sous forme de plaques isolées.

- **FAIENCAGE** : la surface de l'enduit est craquelée et présente une infinité de fissures filiformes. L'eau s'infiltre.

- **FISSURES** : elles peuvent être peu nombreuses mais largement ouvertes ou très nombreuses et de faible ouverture. Des microfissures de faïençage ou de retrait peuvent évoluer vers de plus larges fissures. Il y a risque de pénétration d'eau et de gel.

- **CLOQUAGE** : il s'agit d'un gonflement localisé ou généralisé de l'enduit qui se manifeste par des bosses. Le parement sonne creux car l'enduit n'adhère plus au mur. Il y a risque de décollement par plaques.

- **ECLATEMENT** : l'enduit est parsemé de petits cratères dont le diamètre n'excède pas 20 mm et de profondeur variable. Le symptôme est fréquent sur les enduits à la chaux. Il y a risque d'infiltration d'eau et de désagrégation au gel.

- **EFFLORESCENCE** : l'enduit est coloré de petits halos de couleur blanche ou grise. Ce sont des dépôts cristallins ou amorphes de nature alcaline ou alcalino-terreuse : sulfates, carbonates, nitrates, etc... Ces dépôts de sel peuvent accélérer la désintégration et le décollement des enduits.

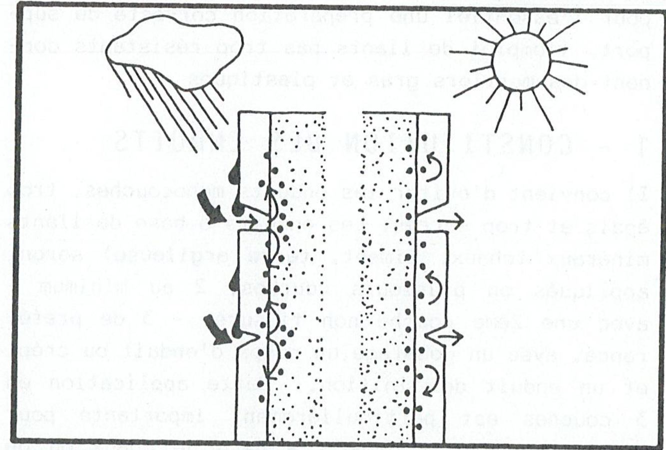
- **INFILTRATION** : l'eau demeure emprisonnée dans l'épaisseur de l'enduit et provoque l'apparition d'efflorescences ou active la pathologie de fissuration et de décollement. Il y a risque de désagrégation rapide de l'enduit.

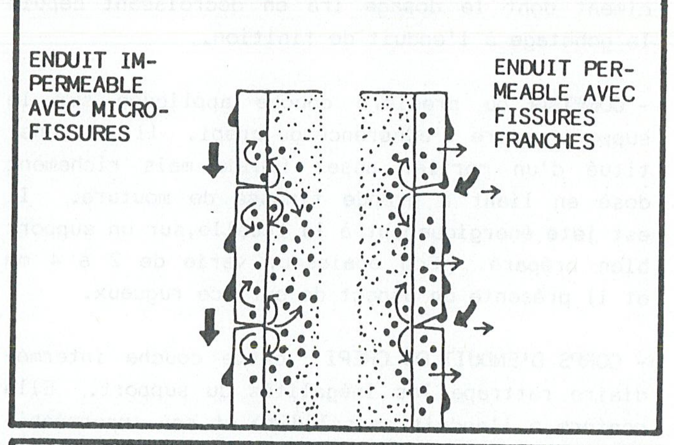
- **SALISSURES** : elles apparaissent sous forme de taches noires ou brunes. Elles proviennent de matières organiques déposées après évaporation de l'humidité ou par un ruissellement localisé.

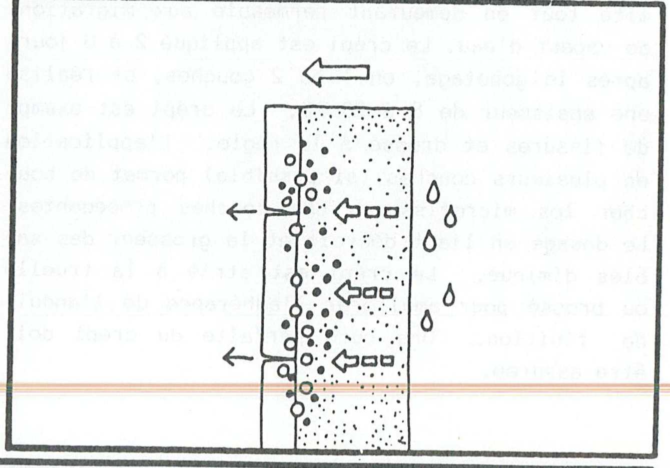
3 - MECANISMES

- DILATATION : le gel ou l'alternance de dessication et d'humidification peuvent faire gonfler la fraction argileuse à l'interface mur/enduit. Si l'enduit est trop rigide, il fissure puis s'effrite. De même, sur un mur de terre hétérogène (gros cailloux isolés dans un pisé p.e.), les dilatations thermiques différentielles entre la terre et les cailloux provoquent des éclatements localisés.
- RETRAIT : lors de son 1er séchage, un enduit opère un retrait qui exerce des contraintes sur le matériau. Il peut y avoir une perte d'adhérence et un décollement. C'est le cas d'un enduit trop rigide sur un support lisse. Sur un support rugueux, le même enduit trop rigide peut occasionner des fissures qui sont franches et peu nombreuses en cas de faible adhérence ou nombreuses et peu ouvertes en cas d'adhérence élevée. Les fissures sont d'autant plus larges que l'enduit est épais et très résistant. Elles apparaissent sur la face externe en cas de retrait dû à une exposition au vent et au soleil : l'enduit est sec (évaporation sur support bien humidifié et saturé qui n'opère pas de succion). Les fissures peuvent aussi se produire à l'interface et progresser vers la surface externe dans le cas d'un mur sec et aride d'eau qui opère une succion capillaire depuis l'interface enduit/support. Les points particulièrement sensibles sont les angles rentrants et les angles d'encastrement des baies.
- PRESSION DE VAPEUR : la vapeur d'eau peut s'accumuler sous forme de condensation à l'interface enduit/support. On observe des cloquages qui peuvent évoluer vers un décollement. Ce phénomène est notoire en climat maritime ou tempéré où la pression de vapeur intérieure est supérieure à la pression de vapeur extérieure. Cette pression différentielle fait migrer la vapeur à travers le mur et l'enduit qui doivent rester perméables : pas de produit étanche ou d'enduit surdosé. La situation inverse (condensation intérieure) peut apparaître sous climat tropical ou dans des locaux climatisés.
- AUTRES : les autres mécanismes à l'origine de la pathologie classique des enduits sont l'infiltration de l'eau de pluie ou de ruissellement par les fissures (pièges d'humidité), l'emploi de matériaux inadéquats (chaux mal éteinte, ciment éventé), les efflorescences dues à l'humidité ou à un lissage exagéré de l'enduit (remontée de laitance), les attaques par les micro-organismes végétaux (lichen, algues, mousses) et les macro-organismes (plantes grimpantes, lierres), une mise en oeuvre baclée (mauvaise préparation du mortier et du support, gel ou forte chaleur), l'érosion due aux pluies, aux vents poussiéreux, aux chocs.

RUISSELLEMENT D'EAU LIQUIDE, EN PAREMENT	VAPEUR D'EAU DANS L'AIR
ACCUMULATION D'HUMIDITE	CONDENSATION DE VAPEUR D'EAU
CIRCULATION D'EAU LIQUIDE, EXTERIEURE	MIGRATION D'EAU, LIQUIDE ET A L'ETAT DE VAPEUR, A L'INTERIEUR DE LA STRUCTURE
MIGRATION ET EVAPORATION D'EAU LIMITEE PAR UN PAREMENT IMPERMEABLE	GRADIANT DE PRESSION DE VAPEUR







Les principaux désordres que l'on peut observer sur les enduits sont pour l'essentiel dus à :
- une mauvaise composition des enduits et une constitution inadéquate;
- une application trop hâtive sans respect des règles de l'art essentielles;
- de mauvaises conditions de mise en oeuvre;
- des techniques d'application peu soignées;
- une mauvaise préparation du support.

Le respect des bonnes pratiques du savoir-faire et de la littérature technique spécialisée sont essentiels. Toutefois, l'application d'enduits durables sur des murs de terre demande des précautions particulières et un grand soin. On retiendra pour l'essentiel une préparation correcte du support, l'emploi de liants pas trop résistants donnant des mortiers gras et plastiques

1 - CONSTITUTION DES ENDUITS

Il convient d'éviter les enduits monocouches, trop épais et trop serrés. Les enduits à base de liants minéraux (chaux, ciment, terre argileuse) seront appliqués en plusieurs couches, 2 au minimum - avec une 2ème couche non fissurée - 3 de préférence, avec un gobetage,un corps d'enduit ou crépi et un enduit de finition. Cette application en 3 couches est particulièrement importante pour des enduits traditionnels à base de chaux ou de ciment dont le dosage ira en décroissant depuis le gobetage à l'enduit de finition.

- **GOBETAGE** ou première couche appliquée sur le support assure l'adhérence du crépi. Il est constitué d'un mortier assez fluide mais richement dosé en liant à grande finesse de mouture. Il est jeté énergiquement à la truelle,sur un support bien préparé. Son épaisseur varie de 2 à 4 mm et il présente un aspect de surface rugueux.

- **CORPS D'ENDUIT OU CREPI :** cette couche intermédiaire rattrape les inégalités du support. Elle confère à l'enduit sa solidité et son imperméabilité tout en demeurant perméable aux migrations de vapeur d'eau. Le crépi est appliqué 2 à 8 jours après le gobetage, en 1 ou 2 couches, et réalise une épaisseur de 8 à 20 mm. Le crépi est exempt de fissures et dressé à la règle. L'application en plusieurs couches (si possible) permet de boucher les microfissures des couches précédentes. Le dosage en liant décroit et la grosseur des sables diminue. Le crépi est strié à la truelle ou brossé pour améliorer l'adhérence de l'enduit de finition. Une cure parfaite du crépi doit être assurée.

- **ENDUIT DE FINITION :** il achève le revêtement et colmate les éventuelles fissures des couches de crépi; il constitue la couche décorative, tant en teinte qu'en texture. L'enduit de finition est la couche la plus faiblement dosée car aucune fissure n'est acceptable. On veille à ne pas trop serrer l'enduit de finition en le talochant par risque d'un ressuage et d'un faïençage. C'est la couche qui pourra nécessiter quelques réfections périodiques.

2 - MOMENTS D'APPLICATION

Il ne faut jamais enduire un mur de terre avant que :
- le retrait de séchage ne soit stabilisé; cela peut prendre quelques semaines ou quelques mois : 6 à 9 mois pour un pisé épais, 3 à 4 mois au minimum jusqu'à 1 an pour les murs monolithiques en bauge ou en terre-paille; dans l'année de la construction pour des murs en adobe ou en blocs comprimés bâtis à l'état sec et pas trop tardivement (2 à 3 mois minimum);
- le tassement du mur ne soit fait; il faut donc attendre un achèvement complet du gros oeuvre y compris toutes charges de planchers et de toiture;
- la migration d'eau et la vapeur du séchage ne soient achevées. Le noyau intérieur du mur ne doit contenir plus qu'un maximum de 5 % d'eau en poids qui donnera une base de décision des travaux d'enduit. Les conditions atmosphériques de la période du chantier jouent un rôle primordial.

3 - CONDITIONS DE MISE EN OEUVRE

- Ne pas enduire par temps très froid ni par temps très chaud. Eviter la pluie battante ainsi que le soleil et le vent violent, les ambiances de sécheresse. Les conditions climatiques idéales sont les périodes tièdes et légèrement humides.
- Réaliser des joints horizontaux ou verticaux afin d'obtenir des panneaux de 10 à 20 m² de surface exécutée en une seule fois, sans reprise. Terminer une façade dans la même journée.
- Apporter un soin particulier à la réalisation des arêtes et des tableaux de baies. En cas de variation de support (terre et bois p.e.), incorporer une armature dans l'enduit en cet endroit. Ne pas descendre l'enduit jusqu'au niveau du terrain naturel (capillarité), réaliser un joint au niveau du soubassement.
- Eviter un séchage trop rapide de l'enduit en pratiquant des pulvérisations d'eau en surface (le matin ou le soir), en disposant des toiles protectrices contre la chaleur et contre l'action des pluies qui peuvent délaver l'enduit. Maintenir une ambiance humide.

- Veiller à la qualité des ingrédients employés (liants et sables) et à une bonne préparation des gâchées.
- Sous climat chaud, il demeure préférable de badigeonner l'enduit environ 3 semaines après son application, pour définitivement boucher les éventuelles fissures.

4 - TECHNIQUES D'APPLICATION

- A la main, pour des enduits à base de terre. Des boules de mortier sont jetées énergiquement puis lissées avec la paume sans pression excessive des doigts. La finition se fait exclusivement avec la paume sans pression des doigts.
- A l'aide d'outils classiques, truelles, taloches, sans serrage excessif.
- A la brosse ou au balai : gobetage liquide.
- A la tyrolienne avec une force de projection réglable.
- Au projecteur pneumatique ou à la pompe à enduit en veillant à contrôler la pression de projection qui doit être ni trop faible ni trop forte.

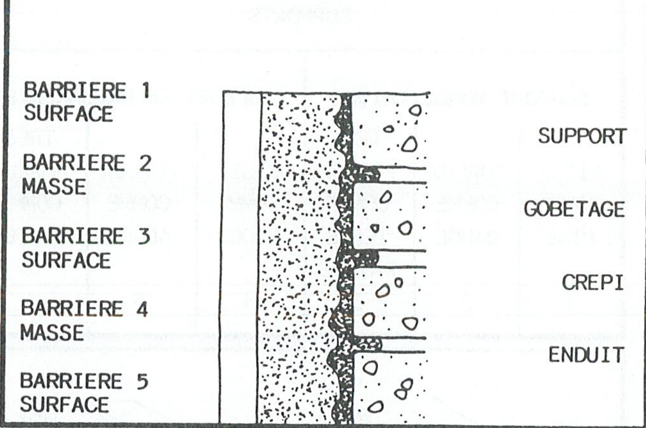
5 - PREPARATION DU SUPPORT

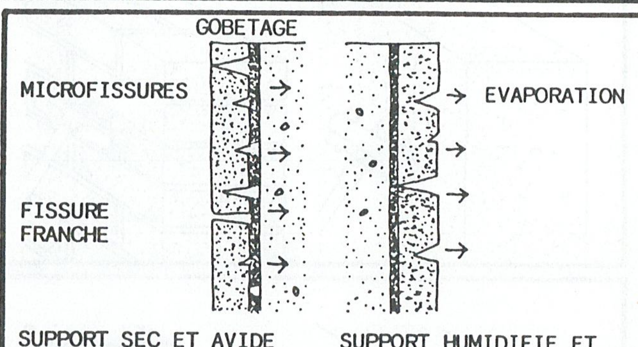
Cette phase préliminaire à l'application de l'enduit doit être particulièrement soignée.

- DEPOUSSIERER : le support doit être débarrassé de toutes matières non adhérentes ou friables, poussières. Il est soigneusement gratté et brossé avec une brosse métallique.

- HUMIDIFIER : le support ne doit pas absorber l'eau contenue dans l'enduit sous risque de compromettre la prise et le durcissement et de réduire l'adhérence de l'enduit. Il faut donc humidifier le support pour éviter une succion capillaire sur l'enduit mais point trop pour qu'il n'y ait pas un film d'eau superficiel qui réduirait l'adhérence. Le support doit être "ressuyé", c'est à dire arrosé à refus. Cette opération peut exiger plusieurs aspersions d'eau. On distinguera les supports stabilisés dans la masse ou en surface (humidifier à refus), des supports non stabilisés qui doivent être à peine humidifiés (risque de gonflement de l'argile). Sur support non stabilisé, un badigeon d'imprégnation peut aider à former les fissures du support.

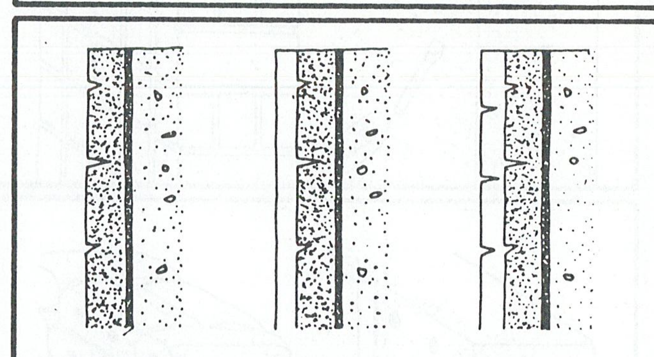
- POINTS D'ACCROCHAGE : sur les briques, les joints sont dégradés au fer à joints. Sur des pisés, un brossage fait apparaître les cailloux. Un bon accrochage prépare l'adhérence de l'enduit.



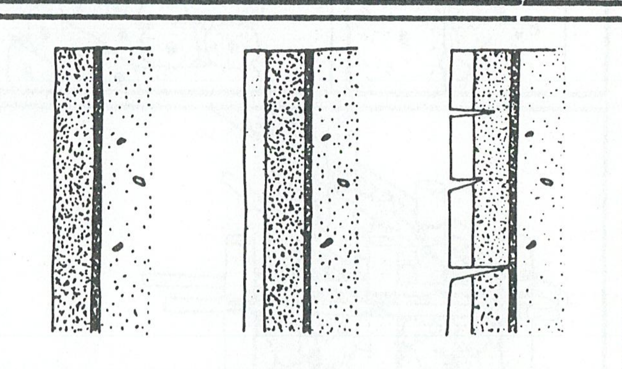


SUPPORT SEC ET AVIDE D'EAU : SUCCION CAPILLAIRE. AMORCE DES FISSURES A L'INTERFACE

SUPPORT HUMIDIFIE ET SATURE : PAS DE SUCCION. AMORCE DES FISSURES A LA FACE EXTERNE

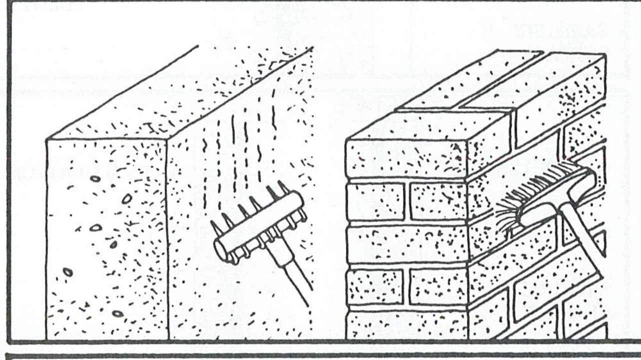


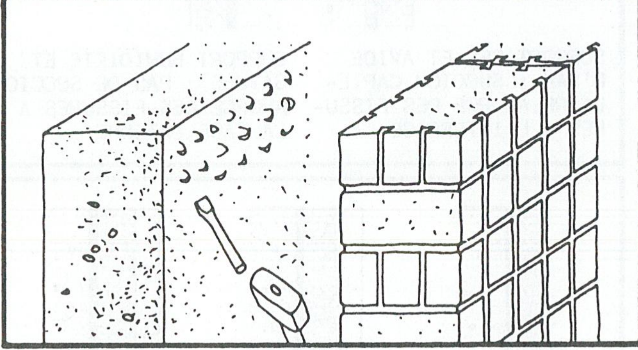
EXEMPLE D'APPLICATION DE LA 3e COUCHE APRES LE RETRAIT DE LA DEUXIEME

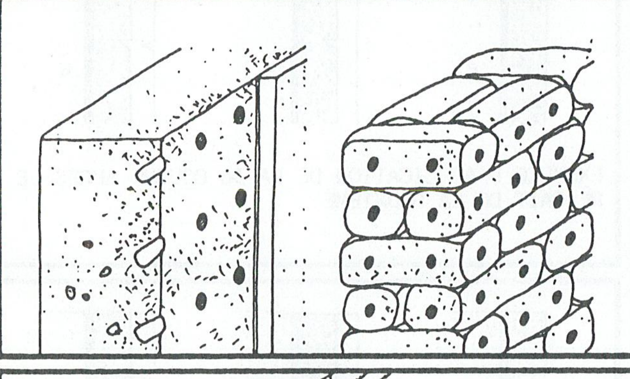


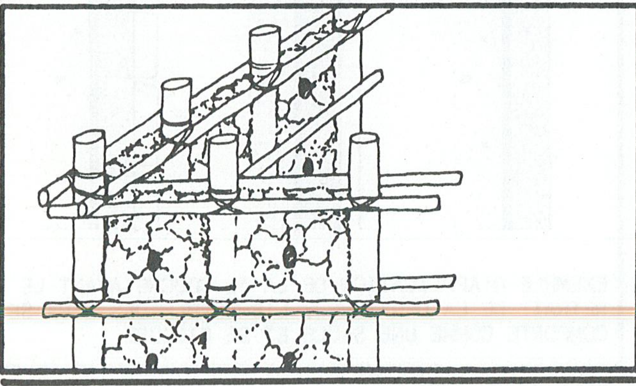
EXEMPLE D'APPLICATION DE LA 3e COUCHE AVANT LE RETRAIT DE LA DEUXIEME : L'ENSEMBLE DES DEUX SE COMPORTE COMME UNE SEULE ET SE FISSURE

SUPPORTS					
SUPPORT MONOLITHIQUE			SUPPORT EN MACONNERIE		
LISSE COMME PISE	POREUX COMME BAUGE	TRES POREUX COMME TERRE PAILLE	LISSE COMME BLOCS	POREUX COMME ADOBE	TRES POREUX COMME MOTTES
1	2	3	4	5	6









1 - COLLE

(Supports 1, 2, 4, 5). L'emploi de colle blanche de menuisier (polyvinyl acetate dilué) a été testé par ITDG (Nigéria, Sri Lanka, Soudan, Egypte). Cette colle diluée dans de l'eau est passée en 2 couches, au pinceau, avec 30 minutes d'attente entre chaque couche. Les poussières sont fixées et l'adhérence du mortier d'enduit est facilitée. Ce traitement du support à la colle doit être de préférence employé avec un enduit armé de fibres. D'autres fixateurs de poussières peuvent être employés s'ils sont compatibles avec les enduits.

2 - GRATTER ET DEPOUSSIERER

(Supports 1, 2, 4, 5). Le grattage du support est notamment indispensable sur les supports friables car il permet d'évacuer toute matière qui manque de cohésion ou mal fixée. Sur un pisé, il met à nu le squelette sableux et graveleux qui accrochera l'enduit. Le dépoussiérage est indispensable sur la plupart des supports en terre. Il peut se faire à la brosse, à sec, ou à l'eau (sans saturer le mur) ou à l'aide d'engins à air comprimé.

3 - STRIER

(Supports 1, 2, 4, 5). Pour des murs en blocs comprimés ou en adobes, on gratte les joints (2 à 3 cm de profondeur) et l'enduit est accroché par les joints en creux. On peut aussi strier les blocs ou les buriner. Le striage est une bonne technique d'accrochage sur le pisé ou sur la bauge. Le parement strié peut être préfabriqué avec des moules spéciaux pour les blocs et des coffrages munis de linteaux cloués, en queues d'aronde, pour le pisé.

4 - TROUER

(Supports 1, 2, 3, 4, 5, 6). Cette technique d'accrochage est notamment adaptée pour des supports du type pisé, bauge ou terre-paille, qui sont percés de trous inclinés à leur état humide ou fraîchement décoffré. Sur des blocs comprimés ou des adobes secs, les trous se font au burin. Les trous doivent être profonds d'au moins 3 cm et jusqu'à 6 cm de préférence. Lorsque l'on construit en boules de terre ou en pains de terre, les trous sont percés sur le matériau frais. L'enduit viendra s'y agripper.

5 - PERCER LES MURS

(Supports 2, 3). Ce procédé est employé au Gabon, sur les maisons en bauge entre clayonnage. Les masses de terre argileuses garnissant le treillis de bois sont percées à l'aide d'un poignard, dans toute leur épaisseur, de part en part. L'enduit est appliqué en intérieur et en extérieur et les 2 couches sont solidarisées par une sorte de pont d'enduit.

6 - POINTS D'ACCROCHAGE

(Supports 1, 2, 3, 4, 5, 6). Le mur est incrusté de fragments solides, éclats de pierre ou tessons de poterie. Cette incrustation est aisée sur des murs de terre frais en bauge p.e. ou même sur du torchis. Les éclats sont incrustés en oblique. Sur des murs en blocs ou en adobe, les éclats sont incrustés dans le mortier de pose frais. On peut aussi prévoir des points d'accrochage de même composition que l'enduit : filets de chaux inclus dans l'épaisseur extérieure du pisé.

7 - CLOUTAGE

(Supports 1, 2, 4, 5). Les clous sont de préférence galvanisés et longs (min. 8 cm), à large tête plate. Ils sont plantés selon un maillage régulier, en trame triangulaire et distants de 10 à 15 cm. Ils peuvent gêner la pose de l'enduit; ainsi peut-on prévoir de percer des trous dans lesquels sont plantés les clous qui affleurent le support ou les planter après la réalisation du gobetage, également affleurant.

8 - TREILLIS

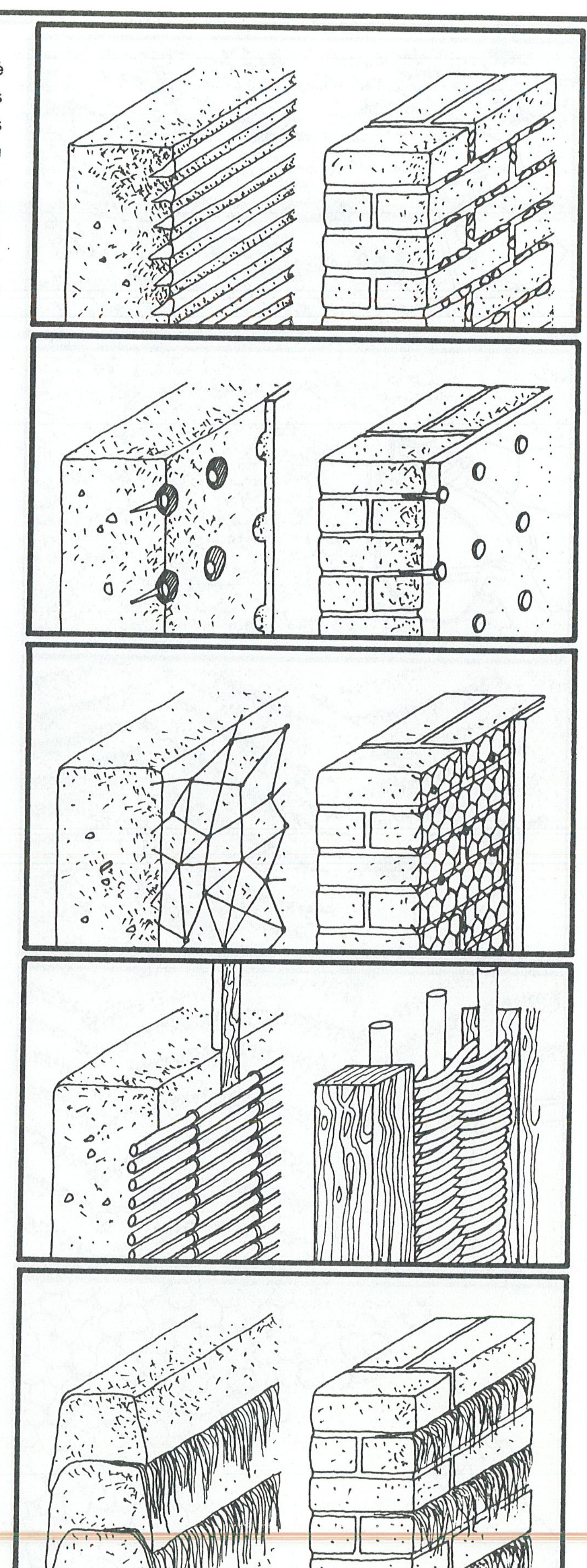
(Supports 1, 2, 3, 4, 5, 6). Un grillage à poule traditionnel (maille hexagonale)peut être employé, si possible galvanisé (façades exposées aux intempéries)bien que le non galvanisé ait une meilleure adhérence. Le grillage est fixé à l'aide de clous entortillés dans la maille et plantés en trame régulière, triangulaire, distants de 10 à 15 cm. Du fil de fer peut être tissé sur un cloutage préalable du mur. Des techniques traditionnelles telles que le pisé à gabion ou le torchis entre clayonnage réalisent un treillis d'accrochage.

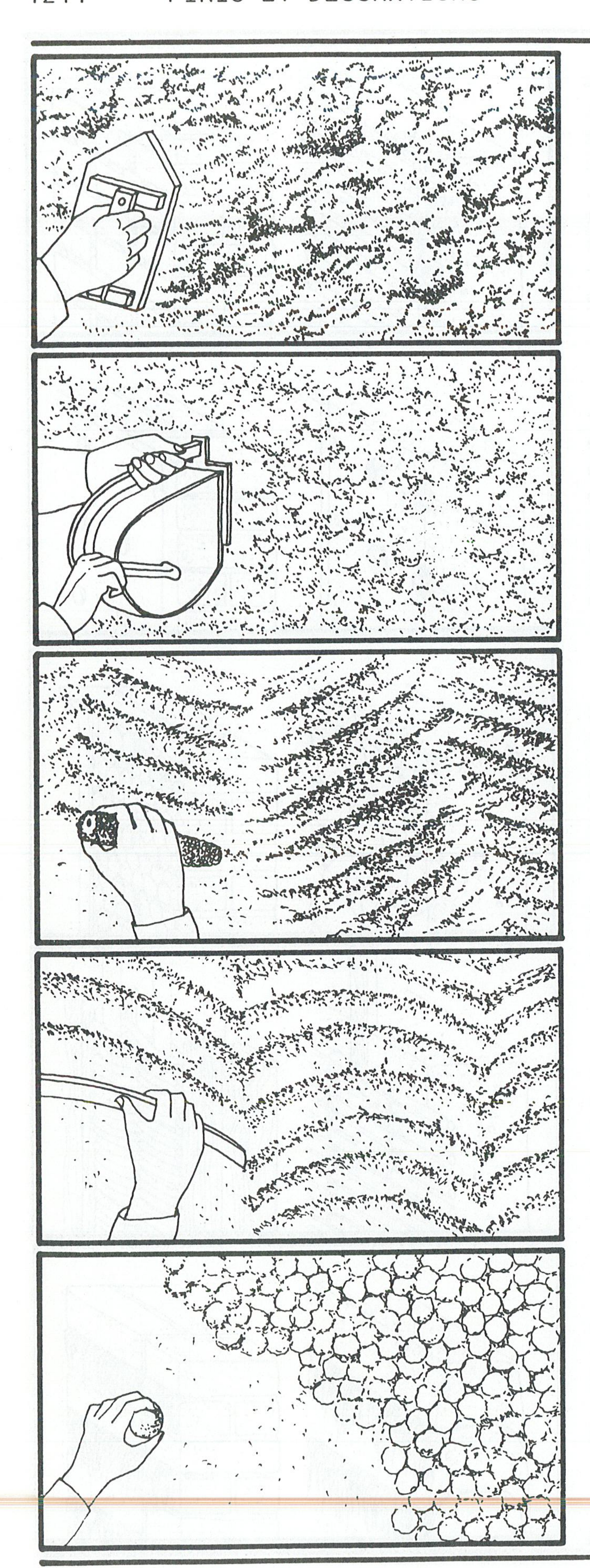
9 - CLAYONNAGES

(Supports 1, 2, 3). Certaines techniques laissent apparaître un clayonnage. C'est le cas du torchis ou de la bauge en garnissage de claies, ou même du pisé à coffrage perdu en roseaux. C'est aussi parfois le cas de la terre-paille lourde que l'on recouvre d'un canis ou de treillis de roseaux qui accrochent l'enduit.

10 - FIBRES

(Supports 2, 4, 5). L'Université de Nairobi a testé un revêtement mural qui combine l'emploi du ciment et les fibres de sisal. Le mélange est appliqué en première couche et les fibres de sisal courtes restent apparentes, facilitant l'adhérence des couches de finition. Le sisal peut être remplacé par d'autres fibres naturelles (coco, chanvre, etc...) ou artificielles (polypropylène fibrillé), des crins d'animaux ou du tissu (jute).





FINITIONS

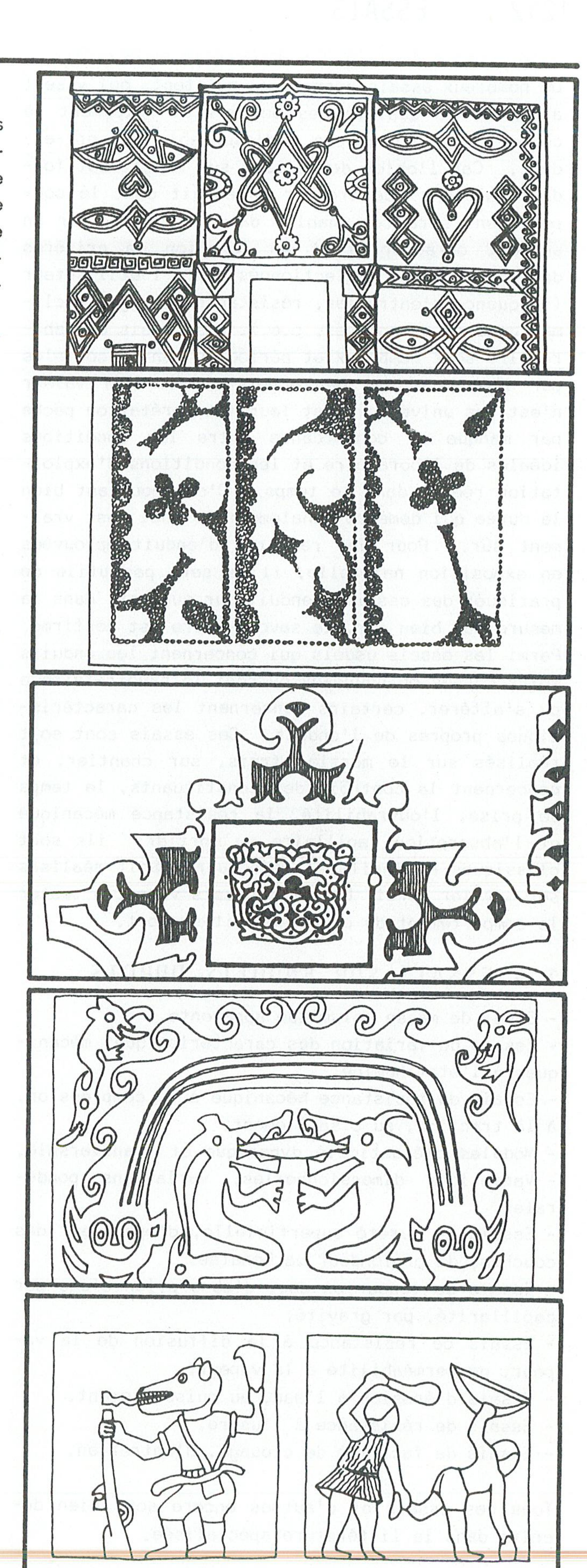
Au-delà de leur seule fonction de protection des murs, en intérieur comme en extérieur, les revêtements de surface jouent aussi un rôle d'ornementation de l'architecture. Cette part de l'enduit dans la finition et le décor des bâtiments est manifeste en maintes contrées et valorisée depuis les temps immémoriaux. Ce sont autant de techniques ou de gestes coutumiers qui exploitent des possibilités aussi diverses que texture ou grain de la couche de finition, reliefs travaillés dans la masse du mur ou dans l'épaisseur de l'enduit, couleurs,placages divers d'éléments rapportés.
Les finitions de la couche d'enduit apparente sont soit effectuées manuellement, soit à l'aide d'outils traditionnels de maçonnerie (truelle,taloche, gratton etc...) ou même mécaniquement à l'aide de matériels de projection.
Les différents traitements de surface du parement, pour obtenir l'aspect final, s'effectuent soit avant durcissement (enduits talochés ou à finition rustique p.e.), soit après durcissement (enduits grattés ou grésés p.e.).
En règle générale, les finitions intérieures sont souvent lisses pour réduire l'accrochage de la poussière due à l'activité intérieure et les finitions extérieures plutôt rugueuses ayant notamment l'avantage d'être moins sensibles aux fissurations ou aux défauts du support.

- **FINITION LISSE** : surtout réalisée en intérieur, dressée à la règle puis à la taloche.
- **FINITION GRATTEE** : l'enduit taloché est gratté après durcissement soit à l'aide de lames métalliques, soit à l'aide de grattons à semelle munie de pointes en acier. Une fois l'enduit sec, une projection d'air ou d'eau permet un dépoussiérage.
- **FINITION RUSTIQUE** : l'enduit est projeté par truellées franches, chacune recouvrant la précédente. Projeté à la truelle par fouettege, l'enduit forme des grains épars et irréguliers.
- **FINITION GRANULEE** : l'enduit a un aspect brut de projection (tyrolienne, sablon ou pneumatique) à petits ou gros grains selon les réglages du matériel de projection. Réduit la fissuration.
- **FINITION RUSTIQUE ECRASEE** : le parement qui est d'abord granulé est ensuite écrasé à l'aide d'une taloche ou d'un platoir.
- **FINITION FOUETTEE** : l'enduit fraîchement appliqué est fouetté avec un balai ou avec des fibres souples (tige de palme p.e.).
- **FINITION AVEC GRANULATS PROJETEES** : des gros sables ou petits cailloux, éclats de pierres ou de coquillages sont projetés sur l'enduit fraîchement appliqué. Cette finition sablée ou cailloutée réduit notoirement la fissuration.

DECORATIONS

Le décor est le véhicule des systèmes de valeurs des sociétés et restitue l'identité des communautés, transmet des signes relevant de la morale ou de l'éthique des peuples. L'architecture de terre africaine est à cet égard d'une richesse incomparable. Le décor y est tout à la fois esthétique, magique ou religieux, apotropaïque (protecteur) ou fondamentalement utilitaire.

Le décor fait jouer à la fois la forme, le relief du parement, la couleur (la variété des pigments naturels ou aujourd'hui artificiels), l'ombre et la lumière. On connaît les reliefs zoomorphes de Chan Chan (Grand Chinù, Pérou) et les reliefs floraux ou végétaux,géométriques aussi des maisons urbaines du Niger ou de maintes ethnies (Hausa, Dogon, Swahili, Asante, Suku, Lobi, etc...). Les variantes du décor géométrique peint ou modelé, sculpté dans l'épaisseur du mur, rapporté par moulage, sont légion. Mais ce sont aussi des décorations plus simples du type placage de boules de terre (Sahara) qui favorise un moindre retrait (répétition de la forme demi-sphérique des boules applaties),qui apporte un agrément thermique d'ombres permanentes et qui rompt le ruissellement. Le décor, c'est aussi l'antique tradition des enduits à fresques peintes, la peinture murale africaine des peuples Kru, Toma, Kisi, Asante, Ubangui qui joue principalement sur les contrastes du noir et du blanc, de l'ocre et du rouge ou la tradition du plaquage céramique connu depuis Babylone (porte d'Ishtar) et toujours actuelle avec les zéliges du Maroc.



De nombreux essais normalisés existent, qui visent à tester la qualité des enduits et notamment le comportement du couple indissociable support-enduit. Car l'objet des essais sur enduit est fondamentalement de trouver un enduit dont le comportement sera convenable, dans le temps, sur un support caractérisé et en fonction de critères de comportement sélectionnés par l'utilisateur (fréquence d'entretien, résistance aux agents climatiques et mécaniques, p.e.). Les essais de laboratoire sont nombreux et périodiquement renouvelés par divers centres de recherche mais leur valeur n'est pas universelle et leur interprétation pêche par manque de concordance entre les conditions idéales de laboratoire et les conditions d'exploitation réelle dans le temps. C'est pourtant bien la durée qui demeure finalement le seul test vraiment sûr. Pour des recettes d'enduit éprouvées en exposition naturelle, il ne sera pas utile de pratiquer des essais d'enduit sur support, dans la mesure où, bien sûr, le savoir-faire est confirmé. Parmi les essais usuels qui concernent les enduits moins connus ou nouveaux ou dont le savoir-faire a pu s'altérer, certains concernent les caractéristiques propres de l'enduit. Ces essais sont soit réalisés sur le mortier frais, sur chantier, et concernent le contrôle des constituants, le temps de prise, l'ouvrabilité, la résistance mécanique et l'absorption capillaire du mortier; ils sont classiques et faciles à effectuer. Soit réalisés sur mortier durci. D'autres essais visent à tester le comportement du couple enduit-support.

1 - ESSAIS SUR ENDUITS DURCIS

- Essai de masse volumique apparente.
- Essais de variation des caractéristiques mécaniques à l'état humide.
- Essais de résistance mécanique à la compression, à la traction, au cisaillement.
- Modules d'élasticité dynamique et transversale.
- Variations dimensionnelles, variations pondérales.
- Essais de dureté superficielle, d'épaisseur des couches, de profondeur carbonatée.
- Essais de teneur en eau, d'absorption d'eau par capillarité, par gravité.
- Essais de résistance à la diffusion de la vapeur, de perméabilité à la vapeur.
- Essais d'érosion à l'eau, au ruissellement.
- Essais de résistance à l'usure.
- Essais de facilité de clouage, d'entretien.

Tous ces essais et d'autres encore sont bien décrits dans la littérature spécialisée.

2 - ESSAIS A PETITE ECHELLE

Ces essais peuvent être intéressants mais demeurent limités car ils ne tiennent pas compte du comportement général du mur enduit, s'en tenant à des morceaux. Bien que scientifiques, ces essais sont loin de restituer les conditions d'exploitation réelle.

- **POROSITE OUVERTE** : l'échantillon est d'abord desséché (air sec ou étuve)jusqu'à poids constant. Il est ensuite immergé complètement (plusieurs procédures) puis essuyé en surface(chiffon humide) et pesé. La porosité s'exprime en % selon le rapport $\frac{P'-P}{P}$ x 100 (P = poids sec; P' = poids imbibé d'eau).
- **TENEUR EN EAU** : mesurée soit à partir de la résistivité du matériau à l'aide d'un appareil à 2 électrodes enfoncées dans l'enduit,soit à l'aide d'une sorte de condensateur plat appliqué sur l'enduit et à lecture directe sur cadran de mesure.
- **CAPACITE D'ABSORPTION** : n fait pénétrer de l'eau sous pression à la surface de l'enduit. On note la quantité d'eau traversant une surface déterminée pendant un temps donné, avec une chambre plate appliquée à l'aide d'un mastic d'étanchéité et reliée à un récipient à niveau fixé(pour une pression constante). On peut aussi immerger une brique enduite sur toute ses faces et apprécier la différence de poids avant et après immersion.
- **EROSION** : par aspersion au jet sous pression ou par gouttes tombant sur le matériau.
- **ESSAIS D'ADHERENCE** : l'adhérence se mesure à l'aide d'un dynamomètre à soufflet avec lequel on arrache une pastille (50 mm)de la surface d'enduit découpée au préalable à l'aide d'une carotteuse sur une profondeur un peu supérieure à celle de l'enduit. La pastille est collée sur un disque de métal avec une colle appropriée. L'adhérence est bonne si la rupture se fait dans l'enduit; autrement, elle se fait au niveau de l'accrochage enduit-support.
- Une autre procédure est énoncée par la norme belge B14-210. Une plaque ronde (Ø 8 cm) ou carrée (10x10 ou 15x15 cm) est fixée au crépi durci avec une colle de résine époxy. La couche d'enduit est sciée à côté de la plaque collée jusqu'à la profondeur du support. L'ensemble est ensuite arraché à l'aide d'un appareil manuel ou hydraulique.
- Un autre essai d'adhérence d'enduit sur pisé a été testé au Maroc. Sur une éprouvette en pisé enduite, un bloc de béton poreux était collé et l'effort de traction était exercé sur un anneau scellé dans l'axe du bloc. Le test imposait une adhérence entre enduit et pisé de 1 kg/cm².

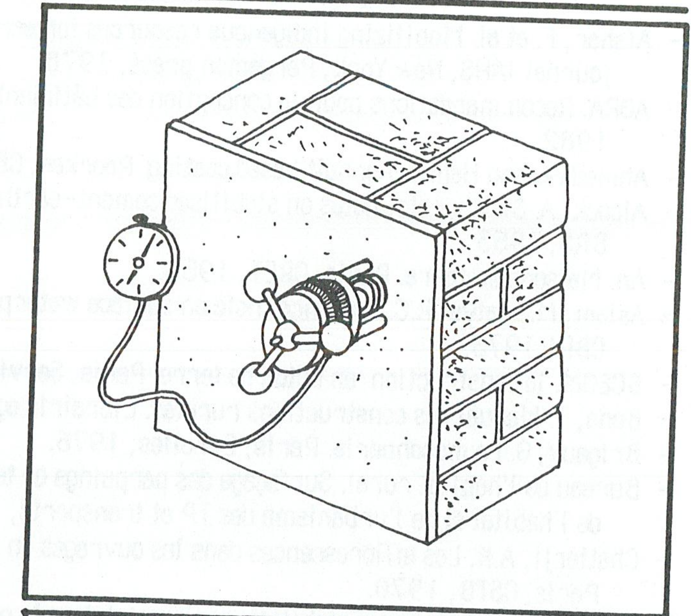
3 - ESSAIS A GRANDE ECHELLE

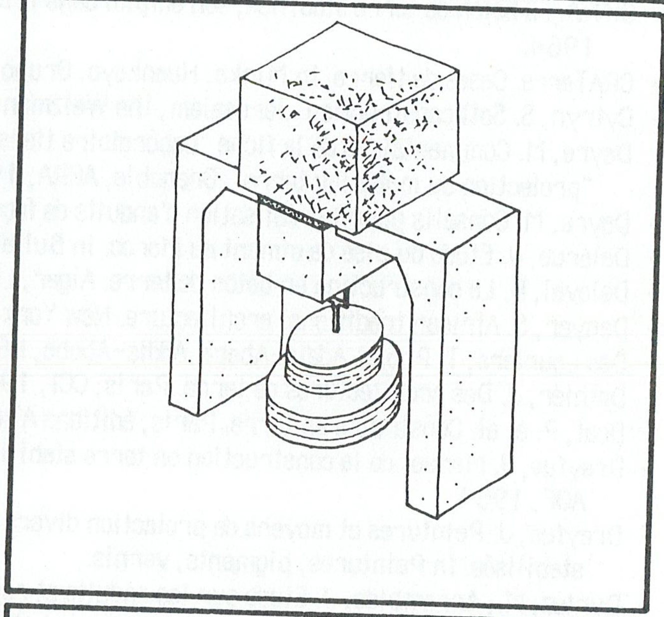
- VIEILLISSEMENT ACCELERE : ce test doit si possible restituer les conditions climatiques locales. Le cycle de vieillissement par exposition à la chaleur, à la pluie et au gel, doit être bien défini pour une bonne interprétation du test car il s'agit de jauger les réponses aux sollicitations plutôt que de constater un état après vieillissement.

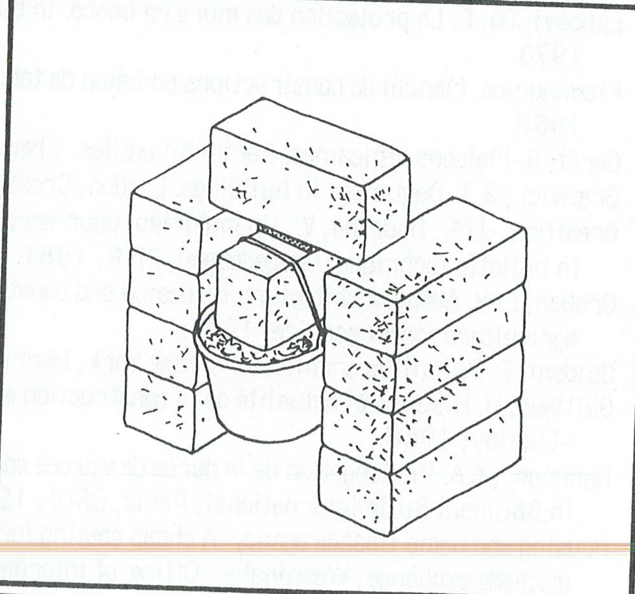
- VIEILLISSEMENT NATUREL : le comportement des enduits, dans le temps, est observé sur des murets exposés aux conditions atmosphériques naturelles. Il convient de veiller à une bonne orientation des murets par rapport aux pluies et aux vents dominants. Ce test a été pratiqué en plusieurs pays mais c'est au Sénégal et aux U.S.A. qu'il a été réalisé à grande échelle et a fait l'objet d'une analyse après plusieurs dizaines d'années. Néanmoins, l'interprétation concerne davantage le comportement de murs de clôture que celui de murs d'habitations : pas d'étude de migration de vapeur qui affecte le plus les enduits.
Les murets ont une surface exposée minimale de 1 m². Ils sont soumis aux plus fortes sollicitations climatiques de la région. Ils sont couverts d'un chapeau étanche débordant de 10 cm, muni d'un larmier. Les murets sont isolés du sol par un soubassement haut d'au moins 25 cm et pourvu d'une barrière anticapillaire. L'enduit arrive jusqu'à 2 cm du chapeau et jusqu'au soubassement, sans les toucher. 1 an au minimum mais plutôt 2 à 3 ans sont nécessaires pour tirer les premières conclusions qui ne tiendront pas compte des désordres subis par les arêtes des murets.

4 - BATIMENTS OU PANNEAUX DE BATIMENTS

Des essais d'exposition naturelle de bâtiments ou de panneaux de bâtiments ont été réalisés aux USA, en Grande-Bretagne et quelques autres pays. Aucun de ces bâtiments n'a été soumis aux cycles normaux d'occupation et les différentes orientations d'exposition ne permettent pas d'établir des comparaisons.
En fait, le meilleur champ d'expérimentation et d'observation est constitué par le patrimoine construit existant.







- Afshar, F. et al. Mobilizing indigenous resources for earthquake construction. In international journal IAHS, New York, Pergamon press, 1978.
- AGRA. Recommandations pour la conception des bâtiments du village terre. Grenoble, AGRA, 1982.
- Ahmed Hassan Hamid. Asphalt based coating. Roorkee, CBRI, 1972.
- Alcock, A. Swishcrete; notes on stabilised cement-earth building in the Gold Coast. Kumasi, BRS, 1953.
- An. Maisons en terre. Paris, CRET, 1956.
- Aslam, M.; Satya, R.C. Technical note on surface waterproofing of mudwalls. Roorkee, CBRI, 1973.
- BCEOM. la construction en béton de terre. Paris, Service de l'habitat, 1952.
- Bona, T. Manuel des constructions rurales. Librairie agricole de la maison rurale, 1950.
- Brigaux, G. La maçonnerie. Paris, Eyrolles, 1976.
- Bureau de l'habitat rural. Surfaçage des parpaings de terre et badigeonnage. Dakar, Direction de l'habitat et de l'urbanisme des TP et transports, 1963.
- Chatterji, A.K. Les efflorescences dans les ouvrages en briques. In Bâtiment built international, Paris, CSTB, 1970.
- CINVA. Le béton de terre stabilisé, son emploi dans la construction. New York, Nations Unies, 1964.
- CRATerre. Casas de tierra. In Minka, Huankayo, Grupo Talpuy, 1982.
- Cytryn, S. Soil construction. Jerusalem, the Weizman science press of Israël, 1957.
- Dayre, M. Commentaires de la fiche "Laboratoire tiers monde" UPA 6, concernant la recherche "protection du matériau terre". Grenoble, AGRA, 1982.
- Dayre, M. Conseils pour la réalisation d'enduits de façade. Privas, DDE Ardèche, 1982.
- Delarue, J. Etude du pisé de ciment au Maroc. in Bulletin RILEM, Paris, 1954.
- Delaval, B. La construction en béton de terre. Alger, LNTBP, 1971.
- Denyer, S. African traditional architecture. New York, Africana, 1978.
- Des Lauriers, T. Projet Addis-Abeba. Addis-Abeba, REXCOOP/MUDH, 1983.
- Dethier, J. Des architectures de terre. Paris, CCI, 1981.
- Doat, P. et al. Construire en terre. Paris, éditions Alternatives et Parallèles, 1979.
- Dreyfus, J. Manuel de la construction en terre stabilisée en AOF. Dakar, Haut commissariat en AOF, 1954.
- Dreyfus, J. Peintures et moyens de protection divers pour construction en terre ou en terre stabilisée. In Peintures, pigments, vernis.
- Duriez, M.; Arrambide, J. Etude sur les enduits et rejointoiements. Paris, Dunod, 1962.
- Ephoevi-Ga, F. La protection des murs en banco. in bulletin d'information, Cacavelli, CCL, 1978.
- Fitzmaurice. Manuel de constructions en béton de terre stabilisé. New York, Nations Unies, 1958.
- Gardi, R. Maisons africaines. Paris-Bruxelles, Elsevier Séquoia, 1974.
- Gratwick, R.T. Dampness in buildings. London, Crosby Lockwood and Son, 1962.
- Grésillon, J.M.; Dourthe, V.. Un matériau pour les constructions rurales, la brique bi-couche. In bulletin technique, Ouagadougou, EIER, 1981.
- Groben, E.W. Adobe architecture its design and construction. New York ,US department of agriculture forest service, 1941.
- Guidoni, E. Primitive architecture. New York, Harry N. Abrams, 1975.
- Guillaud, H. Histoire et actualité de la construction en terre. Marseille, UPA Marseille -Luminy, 1980.
- Hammond, A.A. Prolongation de la durée de vie des constructions en terre sous les tropiques. In Bâtiment Build International, Paris, CSTB, 1973.
- Housing and home finance agency. A cheap coating for unstabilized earth walls. In ideas and methods exchange, Washington, Office of international affairs, 1961.

- International Institute of Housing Technology. The manufacture of asphalt emulsion stabilized soil bricks and brick maker's manual. Fresno, IIHT, 1972.
- Kahane, J. Local materials, a self-builders manual. London, Publications distribution, 1978.
- Kern, K. The owner built home. New York, Charles Scribner's Sons, 1975.
- Kienlin. Le béton de terre. In Revue génie militaire, Paris, 1947.
- L'Hermite, R. Au pied du mur. Paris, Eyrolles, 1969.
- Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et institut de recherches. Directives pour l'exécution de crépissages. Dübendorf, LFEMIR, 1968.
- Letertre; Renaud. Technologie du bâtiment. Gros œuvre. Travaux de maçonneries et finitions. Paris, Foucher, 1978.
- Maggiolo, R. Construcción con tierra. Lima, Comissión ejecutiva inter-ministerial de cooperación popular, 1964.
- Manson, J.L.; Weller, H.O. Building in cob and pisé de terre. BRB, 1922.
- Mc Calmont, J.R. Experimental results with rammed earth construction. American society of agricultural engineers. St Joseph, 1943.
- Mc Henry, P.G. Adobe build it yourself. Tucson, The university of Arizona press, 1974.
- Middleton, G.F. Earth wall construction. Sydney, Commenwealth experimental building station, 1952.
- Miller, L.A. & D.J. Manual for building a rammed earth wall. Greeley, REII, 1980.
- Miller, T. et al. Lehmbaufibel. Weimar, Forschungsgemeinschaften Hochschule, 1947.
- Ministère des affaires culturelles. Vocabulaire de l'architecture. Paris, Ministère des affaires culturelles, 1972.
- Morse, R. Plastic-C coating. Plastic-B/C/D. Priv. com. New York, 1977.
- Museum of New Mexico. Adobe past and present. In El Palacio, Santa Fe, 1974.
- Neubauer, L.W. Adobe construction methods. Berkeley, University of California, 1964.
- Palafitte jeunesse. Minimôme découvre la terre. Grenoble, Palafitte Jeunesse, 1975.
- Patty, R.L. Paints and plasters for rammed earth walls. in Agricultural experiment station bulletin. South Dakota State College, 1940.
- PGC-CSTC. Priv. com. Brussels, 1984.
- Plancherel, J.M. Briques en terre séchée revêtue de planelles en terre cuite. Lausanne, Ecole Polytechnique de Lausanne, 1983.
- Pollack, E.; Richter, E. Technik des Lehmbaues. Berlin, Verlag Technik, 1952.
- Simonnet, J. Recommandations pour la conception et l'exécution de bâtiments en géobéton. Abidjan, LBTP, 1979.
- Soltner, D. Les bases de la production végétale. Angers, collection sciences et techniques agricoles, 1982.
- UNCHS. Construction with sisal cement. In Technical notes. Nairobi, UNCHS (Habitat), 1981.
- Van Den Branden, F; Hartsell, T. Plastering skill and practice. Chicago, American Technical Society, 1971.
- Williams-Ellis, C.; Eastwick-Field, J. & E. Building in earth, pisé and stabilized earth. London, Country Life, 1947.
- Wolfskill, L.A. et al. Bâtir en terre. Paris, CRET.

1300 BIBLIOGRAPHIE

La bibliographie sélective actuelle sur la construction en terre dépasse les 500 titres. La plupart de ces ouvrages sont très difficiles, voire impossibles à acquérir.

La bibliographie présentée ici énumère les principaux ouvrages qui peuvent être aisément obtenus par les voies commerciales normales.

- Adam, J.A. et al. Architektur der Verganglichkeit. Lehmbauten der Dritten Welt. München, Die Neue Sammlung Staadliches Museum für angewandte Kunst, 1981.
- Adam, J.A. Wohn-und Siedlungsformen im Süden Marokkos. München, Georg D.W. Callwey, 1981.
- Adobe News. Adobe codes from around the south west. Albuquerque, Adobe News, 1982.
- Agarwal, A. Bâtir en terre. London, Earthscan, 1981.
- Agarwal, A. Mud, mud. London, Earthscan, 1981.
- Archer, J. and G. Dirt cheap, the mud brick book. Melbourne, Compendium Pty, 1980.
- Arzoumanian, V.; Bardou, P. Archi de terre. Marseille, Edition Parenthèses, 1978.
- Bardou, P.; Arzoumanian, V. Arquitecturas de adobe. Barcelona, GG, 1979.
- Barns, C.G. The sod house. Lincoln/London, Bison book, University of Nebraska press, 1970.
- Boudreau, E.H. Making the adobe brick. California, Fifth Street press, 1974.
- Bunting, B. Early architecture in New Mexico. Albuquerque, University of New Mexico press, 1976.
- Bunting, B. et al. Taos adobes. Santa Fe, Fort Burgwin research center, Museum of New Mexico, 1975.
- Bunting, B.; Lazar, A. Of earth and timbers made. Albuquerque, University of New Mexico press, 1975.
- CINVA. Le béton de terre stabilisé et son emploi dans les travaux de construction. New York, Nations Unies, 1964.
- Denyer, S. African traditional architecture. New York, Africana , 1978.
- Dethier, J. Architetture di terra. Milano, Electra, 1982.
- Dethier, J. Arquitetura de terra ou o futuro de uma tradição milenária. Rio de Janeiro, Avenir Editora Limitada, 1984.
- Dethier, J. Des architectures de terre, ou l'avenir d'une tradition millénaire. Paris, CCI, 1981.
- Dethier, J. Down to earth; mud architecture: an old idea, a new future. London, Thames and Hudson, 1982.
- Dethier, J. Lehmarchitektur. Die Zukunft einer vergessenen Bautradition. München, Prestel, 1982.
- Doat, P. et al. Construire en terre. Paris, éditions Alternatives et Parallèles, 1979.
- Easten, D. The rammed earth experience. Wilseyville, Blue Mountain press, 1982.
- Ebert, W.M. Home sweet dome. Frankfurt am Main, Dieter Fricke GmbH, 1981.
- Fathy, H. Architecture for the poor. Chicago, University of Chicago press, 1973.
- Fathy, H. Construire avec le peuple. Paris, éditions Jérome Martineau, 1970.
- Fitzmaurice, R. Manuel de constructions en béton de terre stabilisée. New York, Nations Unies, 1958.
- Frescura, F. Rural shelter in Southern Africa. Pretoria, Sigma press, 1981.
- Galdieri, E. Le meraviglie dell'architectura in terra cruda. Roma, Editori Laterza, 1982.
- Gano, E.J. Adobe designs. Pueblo, Gano, 1980.
- Gardi, René. Maisons africaines. Paris-Bruxelles, Elsevier Séquoia, 1974.
- Garrison, P. How to build adobe houses...etc. USA, Tab books, Blue Ridge Summit, 1979.
- GATE. Lehmarchitektur, Rückblick-Ausblick. Frankfurt am Main, GATE, 1981.
- Gray, V.; Macrae, A. Mud space and spirit. Santa Barbara, Capra press, 1976.
- Holmes. Mud brick roofs. Washington, International Housing Service, 1957.
- Hopson, R.C. Adobe a comprehensive bibliography. Santa Fe, The lightning tree, 1980.
- International Institute of Housing Technology. The manufacture of asphalt emulsion stabilized soil bricks and briks makers manual. Fresno, IIHT, 1972.
- Kahane, J. Local materials. A self builder's manual. London, Publication distribution co-operative, 1978.
- Kern, K. Rammed earth. Owner builder publications California, 1980.
- Kern, K. The owner built home. New York, Charles Scribner's Sons, 1975.

- Lender, H.; Niermann, M. Lehmarchitektur in Spanien und Africa. Karl Robert Langewiesche, 1980.
- Lumpkins, W. Adobe, past and present. Albuquerque, University of New Mexico printing plant, 1974.
- Lumpkins, W. Casa del Sol. Santa Fe, Santa Fe Publishing Co., 1981.
- McHenry, P.G. Adobe and rammed earth buildings. New York, John Wiley and Sons, 1984.
- McHenry, P.G. Adobe, build it yourself. Tucson The university of Arizona press, 1974.
- Middleton, G.I. Build your house of earth. Victoria, Compendium Pty, 1979.
- Miller, L. and D. Manual for building a rammed earth wall. Greeley, REII, 1980.
- Miller, L. and D. Rammed earth, a selected world bibliography. Greeley, REII, 1982.
- Minke, G. Alternatives Bauen. Kassel, Gesamthohschule, 1980.
- Newcomb, D.G. The owner-built adobe house. New York, Charles Scribner's Sons, 1980.
- Niemeyer, R. Der Lehmbau, seine praktische "Anwendung". Grebenstein, Oeko, 1982.
- O'Connor, J.F. The adobe book. Santa Fe, Ancient City press, 1973.
- Oliver, P. Shelter in Africa. London, Barrie and Jenkins, 1971.
- Schultz, K.V. Adobe craft, illustrated manual. Castro Valley, Adobe craft, 1974.
- Scoggins, H. The portalab manual. Alamorgodo, N.M. Appropriate technology program, 1982.
- Smith, E.W. Adobe bricks in New Mexico. Socorro, New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, 1982.
- Southwick, M. Build with adobe. Chicago, The swallow press, 1971.
- Stedman, M.L. Adobe architecture in New Mexico. Santa Fe, The sunstone press, 1971.
- Stedman, M.L. Adobe remodeling. Santa Fe, The sunstone press, 1976.
- Stulz, R. Appropriate building materials. St. Gallen, SKAT, 1981.
- Van Dresser, P. Homegrown sundwellings. Santa Fe, The lightning tree, 1979.
- Volhard, F. Leichtlehmbau. Karlsruhe, CF Müller GmbH, 1983.
- Welsch, R.L. Sod walls. Nebraska, Purcells Inc, 1968.
- Wienands, R. Die Lehmarchitektur der Pueblos. Köln, Studio Dumont, 1983.
- Wolfskill, L.A. et al. Handbook for building homes of earth. Greeley, REII, 1983.